



# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



**António Manuel da Mata Anastácio**

## **Projeto de um Veículo Anfíbio Não Tripulado**

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica**



Alfeite  
2022





# ESCOLA NAVAL

*ta tant de bi faire*



**António Manuel da Mata Anastácio**

*Projeto de um Veículo Anfíbio Não Tripulado*

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica**

**Orientação de:** Hugo Filipe Diniz Policarpo

O Aluno Mestrando

*António Anastácio*

---

António Anastácio

O Orientador

*Hugo Policarpo*

---

Hugo Policarpo

**Alfeite  
2022**



*“A pessimist sees the difficulty in every opportunity; an optimist sees the opportunity in every difficulty.”*

*Winston Churchill*



Dedico este trabalho aos meus pais.



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que ajudaram e tornaram esta dissertação possível. Gostaria de agradecer principalmente a orientação do Professor Hugo Policarpo, pelo tempo despendido, pela dedicação e gosto com que me acompanhou durante todo o percurso e pela ajuda e conhecimento partilhado que tornou este trabalho possível.

Um obrigado também a todos os meus camaradas do Curso CMG Fernando Monteiro de Barros, pelo apoio prestado e pelas sugestões e troca de ideias.

Por último, à Althima - Engineering Software Solution, Lda e Altair Engineering Inc. por providenciarem o pacote de licenças Altair ONE permitindo o desenvolvimento das simulações CAE realizadas durante a minha dissertação.



## Resumo

Os veículos não tripulados têm vindo a ter uma importância cada vez mais relevante em vários cenários de operações civis e militares. Nesse contexto, o presente trabalho visa desenvolver o projeto conceptual de um veículo anfíbio modular, no sentido que pode facilmente ser adaptado para diferentes tipos de missões, não tripulado e de baixo custo monetário (< 5 k€, sem sensores).

Tendo como principal foco a mais recente Diretiva Estratégica da Marinha Portuguesa, são identificadas as necessidades e estabelecidas as especificações e requisitos necessários para as possíveis missões de interesse direcionadas a veículos anfíbios não tripulados. Prossegue-se com um estudo de mercado onde se averigua quais as soluções já existentes e as características e capacidades de alguns veículos de relevância atualmente disponíveis. Com base no conhecimento adquirido, inicia-se o projeto conceptual propriamente dito onde se identifica e analisa os principais parâmetros de forma a seleccionar os mais indicados para o veículo a desenvolver.

Posto isto, realiza-se o dimensionamento do veículo onde são realizados estudos e análises computacionais estruturais (estáticas e dinâmicas) e de fluidos de forma a garantir que este cumpre com as especificações inicialmente estabelecidas. Assim sendo, tem-se um veículo totalmente elétrico, com dimensões 1.056×0.674×0.451 m (comprimento-largura-altura), com tração terrestre 6×6 capaz de atingir 20 km/h com capacidades anfíbias de deslocação independente em meio aquático até 8 nós, com uma autonomia total estimada de 90 minutos.

Como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento do projeto detalhado do veículo onde são contemplados e avaliados pormenores adicionais de construção e manufatura e é estabelecida toda a documentação e ficheiros que descrevem as especificações e os processos de produção e montagem do veículo, de forma a garantir a integridade e desempenho do veículo em diferentes cenários de missão.

**Palavras-chave:** veículo anfíbio elétrico não tripulado, desenvolvimento de produto, projeto conceptual



## **Abstract**

Unmanned vehicles have become increasingly important in various scenarios of civil and military operations. In this context, the present work aims at the conceptual design of a modular amphibious vehicle, in the sense that it can be easily adapted for different types of missions, unmanned and with low monetary cost ( $< 5$  k€, without sensors).

Having as focus the most recent Strategic Directive of the Portuguese Navy, the needs are identified, and the necessary specifications and requirements are established for the possible missions of interest directed to unmanned amphibious vehicles. Following, market research is conducted to determine which solutions already exist and the characteristics and capabilities of some relevant vehicles currently available. Based on the acquired knowledge, the design phase is addressed in which the main parameters are identified and analyzed in order to select the most suitable for the vehicle to be developed.

Then, the geometry of the vehicle is addressed in which studies and computational structural and fluid analyses are conducted to ensure that it complies with the specifications initially established. With this, one obtains a fully electric vehicle, with dimensions of  $1.056 \times 0.674 \times 0.451$  m (length-width-height), with land  $6 \times 6$  traction capable of reaching 20 km/h and with amphibious capabilities of independent movement in water up to 8 knots, with an estimated total autonomy of 90 minutes.

As a future work, it is suggested the further development of the project, where additional construction and manufacturing details are addressed and evaluated, and all documentation and files that describe the specifications and the production and assembly processes of the vehicle are established, to improve the integrity and performance of the vehicle in different mission scenarios.

**Keywords:** unmanned electric amphibious vehicle, product design and development, conceptual design



# Índice Geral

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	ix
Índice Geral .....	xi
Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas .....	xix
Abreviaturas, siglas e acrónimos.....	xx
Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Histórico .....	1
1.2. Motivação e Contextualização.....	5
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Estrutura.....	7
2. Fundamentos.....	9
2.1. <i>Design</i> e Desenvolvimento do Produto .....	9
2.1.1. Desenvolvimento Conceptual.....	11
2.2. Estabilidade.....	14
2.2.1. Princípio de Arquimedes .....	14
2.2.2. Estabilidade Transversal.....	15
2.3. Propulsão .....	18
2.3.1. Motores Elétricos para propulsão terrestre .....	18
2.3.2. Dimensionamento dos Motores Elétricos para Propulsão Terrestre .....	19
2.4. Baterias .....	20
2.4.1. Baterias de Iões de Lítio vs. Ácido-Chumbo.....	21
2.4.2. Dimensionamento das Baterias .....	22

2.4.3. Análise CFD ( <i>Ansys Fluent</i> ).....	22
2.4.4. Análises estruturais computacionais.....	24
3. Metodologia.....	27
3.1. Planeamento.....	27
3.2. Desenvolvimento Conceptual .....	27
3.2.1. Necessidades.....	27
3.2.2. Especificações-alvo .....	28
3.2.3. Estudo de Mercado .....	28
3.2.4. Conceptualização e desenvolvimento do veículo .....	28
3.2.4.1. Locomoção Terrestre.....	29
3.2.4.2. Dimensionamento dos motores terrestres e baterias .....	30
3.2.4.3. Estabilidade .....	31
3.2.4.4. Dimensionamento dos motores para água.....	31
3.2.4.5. Análises Estruturais Estática e Dinâmica.....	35
4. Resultados.....	39
4.1. Necessidades .....	39
4.2. Especificações-alvo .....	39
4.3. Estudo de Mercado .....	41
4.4. Conceptualização e desenvolvimento do veículo .....	47
4.5. Locomoção Terrestre .....	49
4.6. Dimensionamento dos motores terrestres e baterias.....	52
4.7. Estabilidade Intacta.....	53
4.8. Dimensionamento dos motores para água .....	54
4.9. Análises Estruturais Estática e Dinâmica .....	57
4.10. Estimativa de Custo .....	64
4.11. Especificações e Configuração Final .....	65

5. Conclusão .....	71
Bibliografia.....	73
Apêndices .....	77
Apêndice A – Artigo submetido nas Jornadas do Mar 2022.....	77
Apêndice B – Gráfico de Carenas Direitas retirado do <i>Maxsurf</i> .....	86
Apêndice C – Dimensionamento dos Motores e Cálculo da Autonomia.....	87
Apêndice D – Software utilizado.....	90
Anexos.....	91
Anexo A – <i>Datasheet</i> Fibra de Carbono Zoltek™ PX35 P/TW28-50.....	91
Anexo B – <i>Datasheet</i> Alumínio 7075 – T6.....	92



## Índice de Figuras

Figura 1 - Embarcação controlada remotamente, inventada por Nikola Tesla [2]: a) Modelo real em aço; b) Esquemas técnicos retirados da patente # 613.809. ....	1
Figura 2 - "Fernlenkboot", embarcação utilizada pela Marinha Alemã em 1917 [3]. ....	2
Figura 3 - VTNT: EuroLink Systems Leopardo B [4]. ....	2
Figura 4 - Classificação dos VTNT segundo o tamanho. ....	4
Figura 5 - Mergulhadores do DMS1 em treino em Espanha, a operar um VTNT. [9] ....	6
Figura 6- Utilização de um VTNT pelos Fuzileiros da Marinha Portuguesa, REP(MUS).[10] .....	7
Figura 7 - Seis fases do processo de desenvolvimento de um produto. Adaptado de [11]. .....	9
Figura 8 - Fases do projeto de desenvolvimento conceptual do produto. [11].....	11
Figura 9 - Espiral de projeto, Harvey Evans. [33].....	13
Figura 10 - Etapas de desenvolvimento de um projeto militar naval. [34] .....	14
Figura 11 - Princípio de Arquimedes. [35].....	15
Figura 12 - Braço endireitante. [35] .....	16
Figura 13- Metacentro. [35].....	17
Figura 14 - Altura metacêntrica transversal. [35].....	17
Figura 15 - Componentes do tensor das tensões: Tensões normais $\sigma_{ii}$ e de corte $\tau_{ij}$ . [36] .....	26
Figura 16 - Diagrama das fases do projeto conceptual do veículo anfíbio não tripulado .....	27
Figura 17 - Perfil de Missão 1 (terrestre). ....	30
Figura 18 - Construção da geometria para análise CFD, <i>Ansys Fluent</i> . ....	32
Figura 19 - Construção da geometria para <i>Body of Influence</i> , <i>Ansys Fluent</i> . ....	33
Figura 20 - Face do veículo anfíbio, <i>Ansys Fluent</i> . ....	33
Figura 21 - Malha criada para análise CFD, <i>Ansys Fluent</i> . ....	34
Figura 22 - Dados introduzidos para simulação CFD, <i>Ansys Fluent</i> . ....	34
Figura 23 - Diagrama do estudo realizado no <i>software Ansys</i> . ....	35
Figura 24 - Análise estrutural estática ao casco. ....	36
Figura 25 - Análise estrutural dinâmica ao veículo completo. ....	37
Figura 26 - Função degrau.....	37

Figura 27 - Função meio seno. ....	38
Figura 28 - Função seno. ....	38
Figura 29 - <i>Argonaut</i> . [8].....	41
Figura 30 - <i>Warthog</i> . [29].....	42
Figura 31 - <i>Moose</i> . [30].....	43
Figura 32 - <i>Agema 6x6</i> . [31].....	44
Figura 33 - <i>Agema 8x8</i> . [31].....	45
Figura 34 - USV SL20, da <i>OceanAlpha</i> . [32] .....	48
Figura 35 - USV SL20, da <i>OceanAlpha</i> . [32] .....	48
Figura 36 - Modelação do casco em <i>SolidWorks</i> . ....	49
Figura 37 - Exemplo de roda com motor elétrico.....	51
Figura 38 - Veículo terrestre não tripulado, em <i>SolidWorks</i> . ....	51
Figura 39 - Exemplo de bateria de iões de Lítio.....	52
Figura 40 - Perfil de Missão 1 (terrestre) com distâncias e velocidades praticadas. ....	53
Figura 41 - Gráfico Distância vs. Autonomia para o Perfil de Missão 1. ....	53
Figura 42 - Análise em <i>Maxsurf</i> , relatório hidrostático.....	54
Figura 43 - Gráfico Velocidade vs. Potência, <i>Maxsurf</i> . ....	55
Figura 44 - Análise CFD, <i>Ansys Fluent</i> . ....	55
Figura 45 - Exemplo de motor aquático. ....	56
Figura 46 - Gráfico Distância vs. Autonomia para o Perfil de Missão 2. ....	56
Figura 47 - Distribuição de tensões no casco para o caso a). ....	57
Figura 48 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso b). ....	58
Figura 49 - Distribuição de tensões no veículo para o caso b). ....	59
Figura 50 - Distribuição de tensões no veículo para a carga crítica de 34.5 kN. ....	60
Figura 51 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função degrau. ....	61
Figura 52 - Tensões obtidas na análise estrutural dinâmica ao veículo, função degrau. ....	61
Figura 53 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função meio seno. ....	62
Figura 54 - Distribuição de tensões no veículo para o caso c), função meio seno. ....	62
Figura 55 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função seno. ....	63
Figura 56 - Distribuição de tensões no veículo para o caso c), função seno. ....	63
Figura 57 - Modelo CAD completo do Veículo. ....	66
Figura 58 - Interior do modelo CAD do Veículo com as baterias visíveis. ....	66

Figura 59 - Projeções ortogonais do modelo do Veículo. ....	67
Figura 60 - Conceito futuro para o projeto do Veículo Anfíbio Não Tripulado. ....	67
Figura 61 - Exemplo de conceito final do Veículo Anfíbio Não Tripulado em terra.....	68
Figura 62 - Exemplo de conceito final do veículo numa operação de desembarque anfíbio. .....	68



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre motores elétricos. [15].....	18
Tabela 2 - Comparação entre baterias de Ácido-Chumbo e de íões de Lítio. [15] .....	21
Tabela 3 - Coeficientes de importância das características requeridas para a tração terrestre: 1- menos importante e 4- mais importante. ....	29
Tabela 4 - Estudo de mercado. ....	46
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens entre a utilização de rodas e lagartas. ....	50
Tabela 6 - Análise da configuração para a tração terrestre.....	50
Tabela 7 - Estimativa de custo do veículo. ....	64

## Abreviaturas, siglas e acrónimos

AMN	Autoridade Marítima Nacional
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i>
DEM	Diretiva Estratégica de Marinha
DMS	Destacamento de Mergulhadores Sapadores
EUA	Estados Unidos da América
Eqs.	Equações
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GDL	Graus De Liberdade
IED	<i>Improvised Explosive Device</i>
LA	Linha de Ação
MUS	<i>Maritime Unmanned Systems</i>
NATO/OTAN	<i>North Atlantic Treaty Organization</i> / Organização do Tratado do Atlântico Norte
OE	Objetivo Estratégico
Recon.	Reconhecimento
REP(MUS)	<i>Recognized Environmental Picture Augmented by Maritime Unmanned Systems</i>
SLA	<i>Sealed Lead Acid</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Data</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
VNT	Veículo Não Tripulado
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
VTNT	Veículo Terrestre Não Tripulado

## Introdução

De uma forma geral, os Veículos Não Tripulados (VNTs) (aéreos, terrestres, superfície, submersíveis, anfíbios, ...) apresentam um crescimento exponencial, ao nível do seu desenvolvimento, nas últimas décadas. Este crescimento acompanha a inerente evolução tecnológica assim como a identificação das diferentes necessidades que vão sendo reconhecidas pelas diferentes áreas dos setores industriais civis e militares. Assim, cada vez mais, os VNTs são desenvolvidos e utilizados para atuarem em inúmeros tipos de missões que podem requerer diferentes meios operacionais.

Neste capítulo introdutório é realizado um enquadramento histórico, são apresentadas a motivação, a contextualização, os objetivos do tema desta dissertação e uma breve descrição da estrutura deste documento.

### 1.1. Enquadramento Histórico

Na área naval, as origens dos VNTs remontam ao final do século XIX, com o desenvolvimento de duas embarcações com controlo remoto da autoria do célebre inventor e cientista, Nikola Tesla [1]. Em 1898, Tesla desenvolve duas embarcações de aproximadamente 1.80 m, construídas em aço, ver Figura 1 a), e equipadas com recetores rádio que, ligados a atuadores eletromecânicos, controlam o sistema de governo da embarcação, ver Figura 1 b). Tesla denominou-as de “*teleautomatons*” sendo que possuíam um sistema de propulsão elétrica.

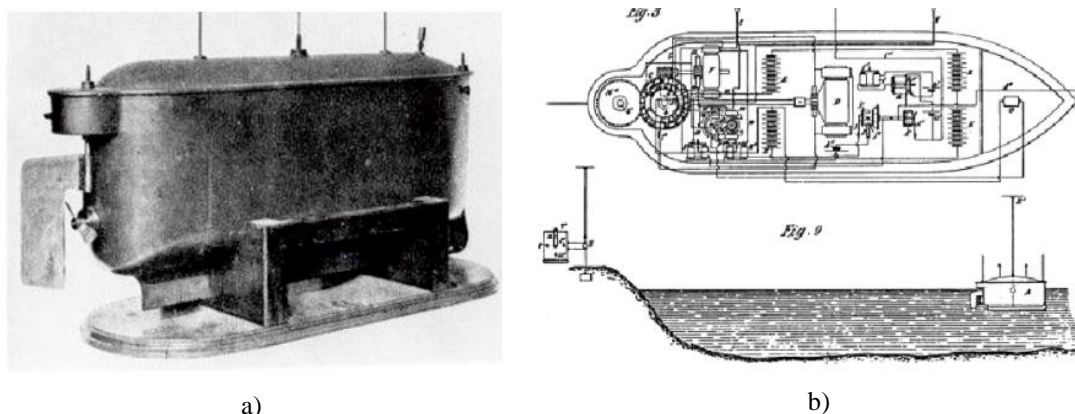


Figura 1 - Embarcação controlada remotamente, inventada por Nikola Tesla [2]: a) Modelo real em aço; b) Esquemas técnicos retirados da patente # 613.809.

Em termos bélicos, a utilização de VNTs controlados remotamente começou de uma forma mais predominante na Primeira Guerra Mundial, na qual a Marinha do então Império Alemão utilizou embarcações controladas por rádio, ver Figura 2, que tinha como objetivo transportar uma carga explosiva que seria detonada após o impacto com um navio inimigo [1].



Figura 2 - "Fernlenkboot", embarcação utilizada pela Marinha Alemã em 1917 [3].

Em termos mais específicos, no que diz respeito a Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNT), do inglês “*Unmanned Ground Vehicles*” (UGV) [4], ver Figura 3, estes podem ser genericamente definidos como um equipamento mecanizado que se move através do solo e serve como um meio para transportar algo, mas explicitamente não transporta um ser humano [5].



Figura 3 - VTNT: EuroLink Systems Leopard B [4].

Historicamente, os VTNTs começam a ser utilizados em guerras, principalmente após lições aprendidas na Primeira Guerra Mundial, como forma de fazer chegar e detonar cargas explosivas em alvos inimigos, ver Figura 4 , sem sacrificar vidas humanas [1].

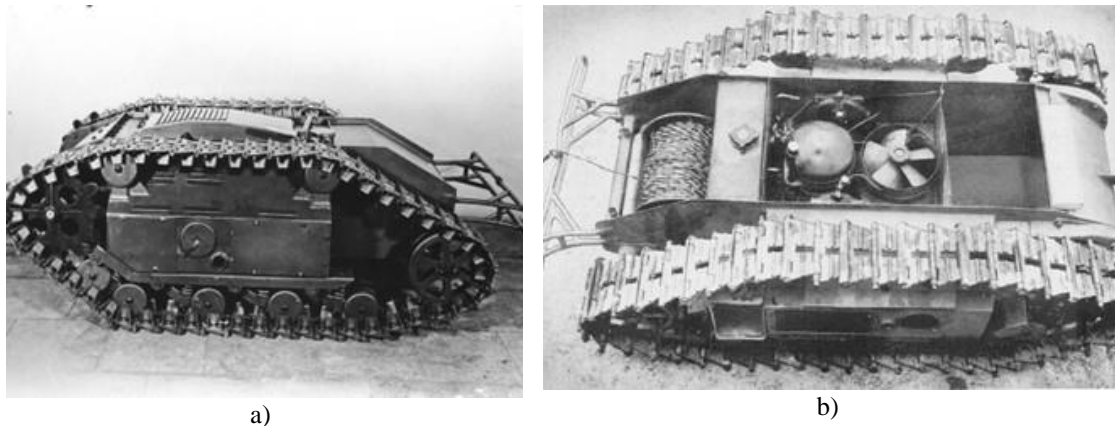


Figura 4 - Exemplo de VTNT utilizado na Segunda Guerra Mundial [7]: a) Mina remota *Goliath* Sd.Kfz 303; b) Interior da mina remota com cabo de controlo à esquerda, motor a gasolina ao centro e compartimento para os explosivos à direita.

Atualmente, os VTNTs desempenham um importante papel em diversos tipos de missões como investigação científica, vigilância e reconhecimento, busca e salvamento, inativação de engenhos explosivos, transporte de tropas e equipamento, emprego de armamento, entre outras.

Já na última década, desenvolveram-se projetos de VTNTs dotados de uma capacidade anfíbia de operações, configuração semelhante ao que se pretende alcançar nesta dissertação, e.g., o *Argonaut* ilustrado na Figura 5 .



Figura 5 - *The Argonaut*, VTNT anfíbio. [8]

É de notar que este projeto se encontra ainda em desenvolvimento por parte de uma parceria entre duas empresas, a *Dynautics* e a *Ultrabeam Hydrographic*, para o Ministério da Defesa do Reino Unido.

Por sua vez, e uma vez que, atualmente, grande parte dos veículos anfíbios caem dentro da classificação de VTNT (com capacidades anfíbias), estudou-se a seguinte classificação de VTNT criada pelo Exército dos EUA. Assim, os VTNT podem ser classificados segundo três categorias principais [6]:

- Tamanho, Figura 4;
- Modo de operação, Figura 7;
- Tipo de armamento, Figura 8.

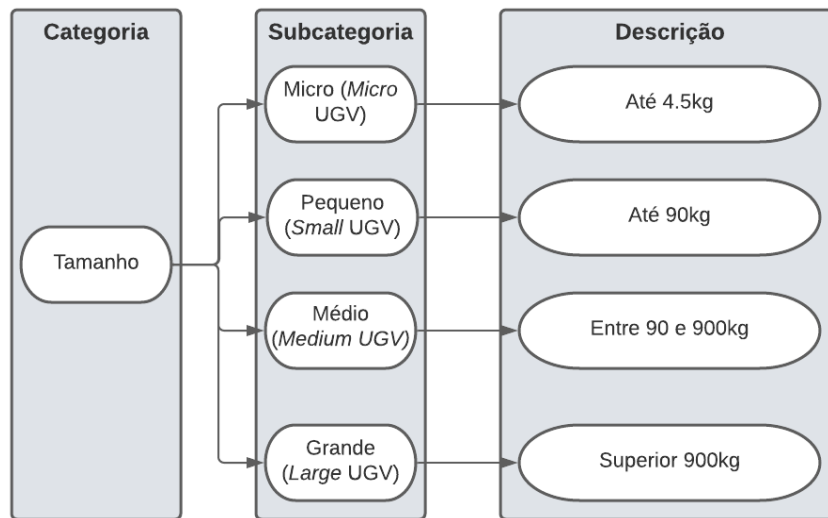


Figura 4 - Classificação dos VTNT segundo o tamanho.

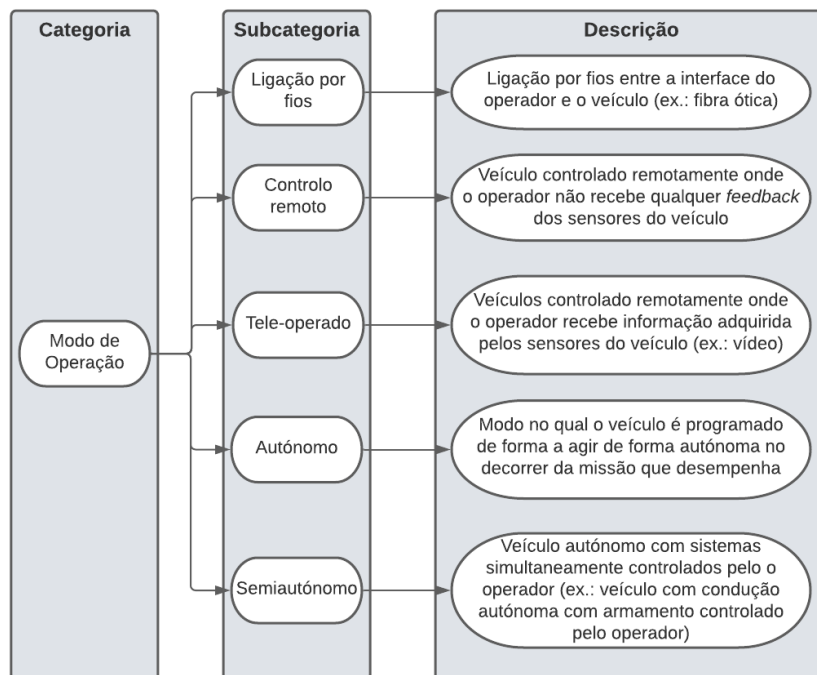


Figura 7 - Classificação dos VTNT segundo o modo de operação.

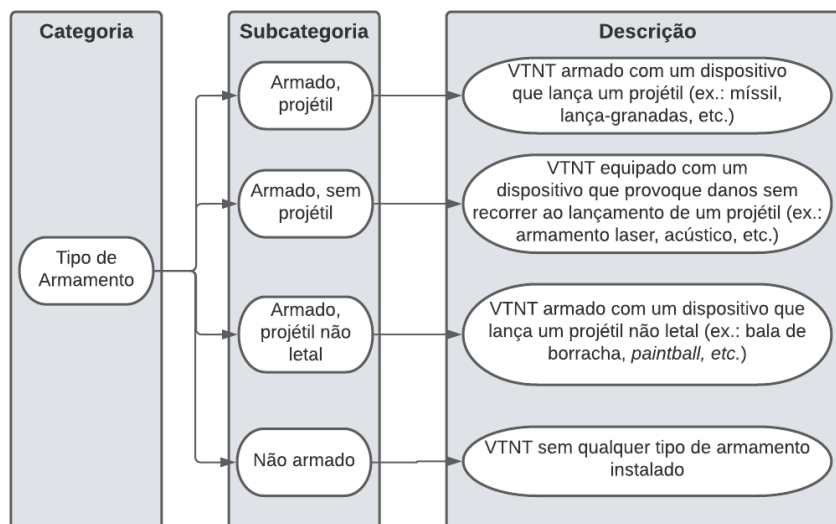


Figura 8 - Classificação de um VTNT quando ao tipo de armamento.

## 1.2.Motivação e Contextualização

Analisando a mais recente revisão da Diretiva Estratégica de Marinha 2018, realizada em 2021 (DEM 2018 REV 2021), conclui-se que a concretização do projeto proposto nesta dissertação vai ao encontro de diversas Linhas de Ação (LA) dos Objetivos Estratégicos (OE) da Perspetiva Operacional.

- OE7 – OTIMIZAR a presença e o controlo nos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição nacional.
  - LA7.05 – Explorar as oportunidades para o desenvolvimento de projetos para incrementar a vigilância marítima, tendo presentes as orientações ministeriais da defesa, em parceria com as universidades e a indústria nacional, integrando tecnologias inovadoras, que, complementando os atuais sistemas de vigilância, permitam mitigar as lacunas existentes.
- OE8 – AUMENTAR a prontidão das unidades operacionais e o seu empenhamento no apoio à política externa.
  - LA8.06 – Incrementar as capacidades no âmbito dos veículos não tripulados (de superfície, submarinos e aéreos), potenciando o seu emprego e a sua utilização operacional, bem como as capacidades defensivas contra este tipo de sistemas, através do desenvolvimento de conceitos e de experimentação operacional adequados e do apoio à

investigação e desenvolvimento, em parceria com as entidades nacionais e internacionais relevantes.

- OE9 – CONSOLIDAR o conhecimento e a atuação no quadro das ciências do mar e da cultura marítima
  - LA9.06 - Reforçar a investigação e desenvolvimento, em parceria com entidades nacionais e internacionais relevantes, com enfoque nas áreas do conhecimento situacional marítimo, dos veículos não tripulados, dos sistemas de apoio à decisão e noutros domínios relevantes para a missão da Marinha e da Autoridade Marítima Nacional (AMN).

Tendo em conta todas as restrições e fatores limitativos no acesso a diversos cenários de operações, um dos objetivos desta dissertação passa pela introdução de um meio inovador que permitirá à Marinha e às Forças Armadas um maior alcance em zonas estuarinas e costeiras. A criação de um projeto deste tipo daria à Marinha a capacidade de cumprir com as linhas de ação anteriormente dispostas uma vez que este veículo tem as capacidades de potenciar o uso de veículos não tripulados e aumentar a capacidade de aplicar este meio tanto em ações de vigilância como de investigação. O desenvolvimento deste projeto tem por motivação o apoio a operações anfíbias dos Fuzileiros e Mergulhadores (ver Figura 5), investigação, apoio à população em cheias e outras catástrofes naturais e também vigilância dos rios e suas margens, bem como de praias e zonas costeiras.



Figura 5 - Mergulhadores do DMS1 em treino em Espanha, a operar um VTNT. [9]

Para além das motivações operacionais expostas anteriormente, este projeto visa fortalecer ainda mais a presença de Portugal e da Marinha Portuguesa no projeto da NATO intitulado *Maritime Unmanned Systems* (MUS).



Figura 6- Utilização de um VTNT pelos Fuzileiros da Marinha Portuguesa, REP(MUS).[10]

A Figura 6, ilustra uma imagem no contexto do exercício *Recognized Environmental Picture Augmented by Maritime Unmanned Systems* (REP(MUS)) organizado em Portugal em 2019.

### **1.3.Objetivos**

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um projeto conceptual de um VTNT anfíbio, 100% elétrico, modular na medida em que pode incorporar diferentes sensores que dependem da missão a desempenhar, portátil e de baixo custo de fabrico e de operação. Assim, o intuito é a concretização de um VTNT anfíbio de forma a rentabilizar a sua construção dotando-lhe de capacidades que façam deste meio o mais versátil possível nos mais diversos cenários operacionais.

### **1.4.Estrutura**

Este documento é composto por cinco capítulos principais. Neste primeiro capítulo introdutório começa-se por realizar um breve enquadramento histórico dos VNTs navais, seguindo-se a contextualização, motivação e principal objetivo do tema desta dissertação

No segundo capítulo, apresentam-se os principais fundamentos necessários para sustentar o projeto e desenvolvimento conceptual do veículo. Assim, começa-se por introduzir as principais etapas de projeto e desenvolvimento conceptual de um produto,

os princípios que regem a estabilidade dentro de água e o dimensionamento dos motores elétricos e respectivas baterias.

No terceiro capítulo são estabelecidas as metodologias utilizadas para o projeto e desenvolvimento conceptual do veículo. Após a etapa inicial de planeamento, segue-se a metodologia do desenvolvimento conceptual onde são identificadas as necessidades, as especificações alvo, é realizado um estudo de mercado com o objetivo de analisar a concorrência. Com base nos resultados destas etapas, inicia-se o desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*) do veículo, estabelecem-se as metodologias para a seleção da locomoção terrestre, para o dimensionamento dos motores e para a estabilidade do veículo dentro de água.

No quarto capítulo são apresentados os principais resultados obtidos através das metodologias estabelecidas. Nomeadamente, as necessidades identificadas, as especificações alvo iniciais, o estudo de mercado que indiretamente inspiraram a primeira versão da forma do casco, a seleção do tipo de locomoção terrestre, a quantidade e dimensionamento dos motores e resultados das análises de estabilidade do veículo dentro de água.

No quinto capítulo são referidas as principais conclusões assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Fundamentos

Neste capítulo, são sucintamente apresentados os fundamentos que sustentam o projeto e as metodologias utilizadas para o desenvolvimento conceptual do veículo.

Assim, uma das primeiras fases no decorrer da presente dissertação consiste no aprofundamento dos conhecimentos na temática de *design* de e desenvolvimento do produto.

### 2.1. *Design* e Desenvolvimento do Produto

Apesar de na linguagem anglo-saxónica existir uma distinção entre os conceitos de *project* e *design*, em português, ambos os termos significam projeto.

No entanto, o processo de desenvolvimento ou projeto (*project*) de um produto consiste no processo completo que engloba três funções principais: *marketing*, *design* e manufatura.

Desta forma, constata-se que o projeto (*design*) pode ser efetivamente considerado como a parte fundamental no desenvolvimento de um produto, mas não contempla os aspetos relacionados com a parte financeira, comercial, logística, recursos humanos, entre outros. Entende-se então por projeto (*design*) unicamente o conjunto de processos, cálculos e planos que integram o desenvolvimento conceptual de um produto/objeto antes de este ser produzido [12].

Um processo genérico de desenvolvimento de um produto pode ser dividido em seis fases, como se ilustra na Figura 7.

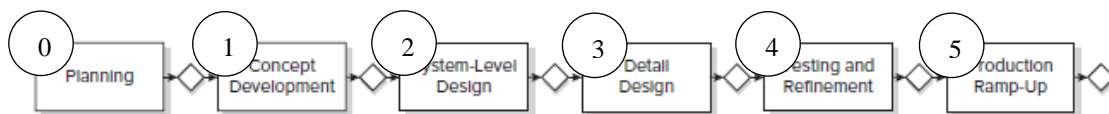


Figura 7 - Seis fases do processo de desenvolvimento de um produto. Adaptado de [11].

Estas fases podem ser brevemente descritas como:

0. **Planeamento:** A fase de planeamento, também conhecida como “fase zero”, pois precede, principalmente a nível industrial, a aprovação do projeto e o início do mesmo. Esta fase inicia-se com a identificação dos objetivos, avaliação das tecnologias atualmente disponíveis e a estratégia a adotar.

1. **Desenvolvimento conceptual:** nesta fase, são identificadas as necessidades alvo que o produto terá de satisfazer. Usualmente, começa-se por realizar uma análise de produtos concorrenciais e estudam-se e avaliam-se conceitos alternativos do produto de onde se seleciona um ou mais conceitos para desenvolvimento e testes futuros. Desta fase resulta a forma, função e características do produto, bem como um conjunto de especificações e por vezes uma justificação económica para a viabilidade do produto.
2. **Design dos sistemas:** A fase de *design* ao nível dos sistemas inclui a definição da arquitetura do produto, a decomposição do mesmo em subsistemas e componentes e o *design* preliminar dos componentes principais. O *output* desta fase geralmente inclui a geometria global do produto e a especificação funcional de cada um dos seus subsistemas.
3. **Design detalhado:** O *design* detalhado inclui a especificação dos materiais, geometria e tolerâncias de todos os componentes do produto. É ainda estabelecido um plano dos processos de manufatura para o fabrico dos componentes sendo que são identificados quais os componentes que podem ser adquiridas no mercado. Desta fase resulta a documentação e ficheiros que descrevem as especificações e os processos de produção e montagem dos componentes do produto.
4. **Testagem e melhoria:** Esta fase envolve a construção e avaliação de protótipos do produto. O objetivo desta fase consiste na deteção e avaliação de falhas e problemas práticos relacionados com o funcionamento e aplicação do produto em situações reais. As conclusões retiradas dos testes realizados são utilizadas como ponto de partida para implementar em eventuais melhorias que venham a se realizadas.
5. **Início de produção:** Nesta última fase, é iniciado o processo de produção. Uma vez definida a mão de obra necessária para satisfazer as necessidades de produção, o sistema de produção evolui gradualmente até o produto estar disponível para ser distribuído e comercializado. Geralmente, realiza-se ainda uma revisão pós-lançamento do produto onde são reavaliadas as perspectivas comerciais e técnicas, identificando formas de melhoramento neste e em produtos futuros.

É de notar que, alguns dos termos anteriormente mencionados, e.g., produto, cliente, entre outros, têm designações cuja semântica para o mundo militar naval são diferentes, i.e., plataforma/equipamento, comunidade operacional, respetivamente.

Das fases anteriormente descritas, aquela que é considerada como mais relevante para o progresso desta dissertação, dado que trata do projeto ao nível conceptual, é a fase relacionada com o desenvolvimento conceptual do produto que é descrita com mais detalhe de seguida.

### 2.1.1. Desenvolvimento Conceptual

O processo de criação e desenvolvimento de um ou vários conceitos de um produto é nesta fase usualmente designado como o processo de *front-end* [11] onde se pretende melhorar/otimizar os resultados a serem obtidos e uma forma sequencial e iterativa, como se ilustra na Figura 8.

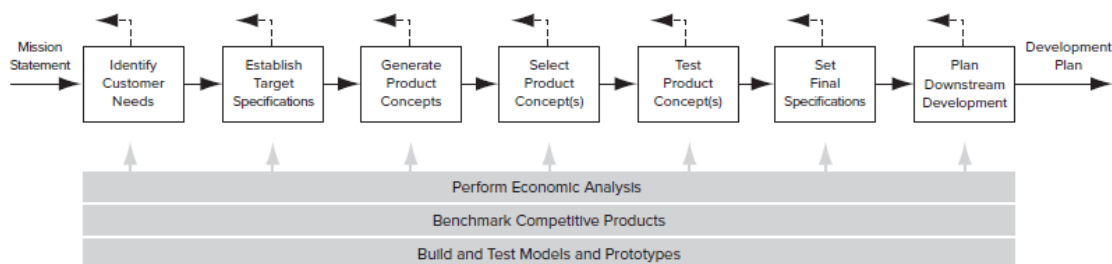


Figura 8 - Fases do projeto de desenvolvimento conceptual do produto. [11]

Assim, o processo de desenvolvimento conceptual do produto inclui as seguintes fases:

- **Identificar as necessidades:** O objetivo desta atividade consiste em identificar as necessidades dos clientes e comunicá-las eficazmente à equipa de desenvolvimento. O *output* deste passo resulta num conjunto de necessidades que são cuidadosamente identificadas e organizadas numa lista hierárquica de acordo com as ponderações de importância consideradas.
- **Estabelecer especificações-alvo:** a tradução das necessidades resulta, em termos técnicos, num conjunto de especificações que são refinadas para serem consistentes com os constrangimentos associados ao conceito do produto.

fornecendo uma descrição precisa do que o produto tem de cumprir. Desta fase resulta uma lista de especificações-alvo.

- **Criação de conceitos:** Com base nas especificações alvo segue-se a exploração cuidadosa e exaustiva do espaço de conceitos do produto que possam atender às necessidades previamente identificadas. A geração de novos conceitos contempla uma mistura de pesquisa externa, resolução criativa de problemas dentro da equipa, e exploração sistemática de diferentes formas de solucionar os desafios impostos.
- **Escolha do conceito:** nesta fase são analisados e eliminados sequencialmente um conjunto de conceitos do produto com o objetivo de identificar o conceito mais promissor. Este processo geralmente requer várias iterações e pode dar origem a novos conceitos, novas abordagens e outras melhorias.
- **Teste/Análise do conceito:** um ou mais conceitos são então testados/analísados, e.g., recorrendo a simulações numéricas, para verificar se é possível satisfazer as necessidades previamente identificadas, avaliar o potencial do mercado referente ao produto e identificar quaisquer defeitos que devem/podem ser corrigidos durante o desenvolvimento futuro do produto.
- **Escolha das especificações finais:** nesta fase, as especificações-alvo anteriormente definidas são revistas podendo sofrer alterações que dependem dos resultados da etapa anterior, e.g., aumento de massa. Nesta fase, a equipa deve estabelecer e comprometer-se com valores específicos atendendo aos constrangimentos inerentes ao conceito do produto, limitações identificadas e aos compromissos entre custo e desempenho.

Por sua vez, verifica-se uma correlação entre o método mais geral de desenvolvimento de produto abordado nesta dissertação e os métodos adotados no desenvolvimento de projetos militar navais.

Por exemplo, o método para projetos navais desenvolvido por J. Harvey Evans em [33], tal como o exposto anteriormente no capítulo 2.1, é um processo iterativo que requer uma abordagem por meio de diversas áreas científicas para que se crie um projeto capaz de colmatar os problemas e as necessidades identificadas. Este método é conhecido pela sua representação em espiral que demonstra visualmente os diversos processos pelos quais se passam de forma sequencial e iterativa até se obter o produto final, Figura 13.

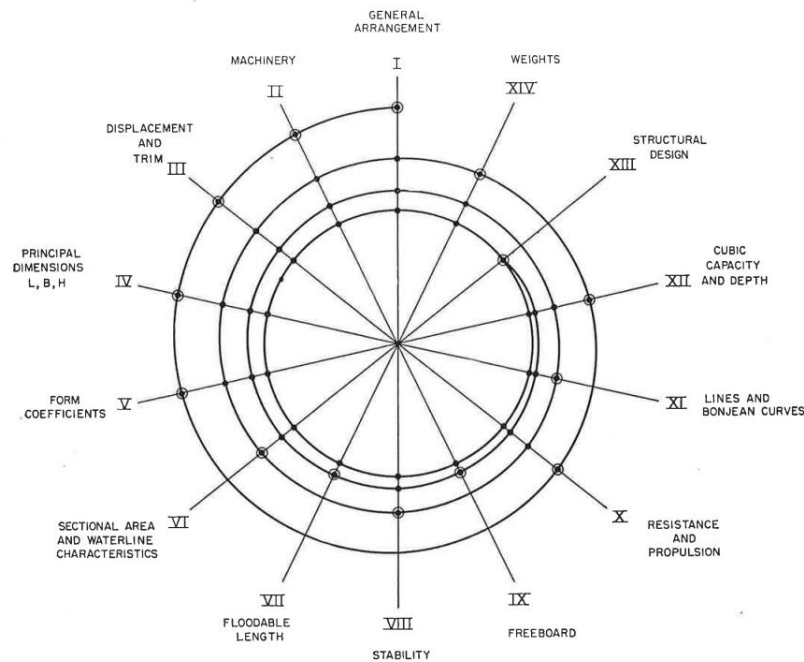


Figura 9 - Espiral de projeto, Harvey Evans. [33]

Outro método de projetos militares no meio naval encontra-se descrito na publicação “*NATO AAP-20: NATO Programme Management Framework*” [34]. Este é um outro exemplo do qual se destacam algumas similaridades com os métodos anteriormente descritos, sendo possível articulá-los de forma a obter o processo de desenvolvimento de um projeto o mais eficiente e eficaz possível.

Este método compreende diversas fases que se assemelham às descritas nos métodos apresentados nas obras “*Product Design and Development*” [11] e “*Project Management Book of Knowledge*” [12]. As fases deste método são as seguintes: Projeto Pré-conceitual, Projeto Conceptual, Desenvolvimento, Produção, Utilização, Suporte e Abate (ver Figura 14). Tal como os outros métodos, esta sequência de fases é na verdade articulada com uma metodologia iterativa em todos os passos de forma a rever e melhorar o projeto.

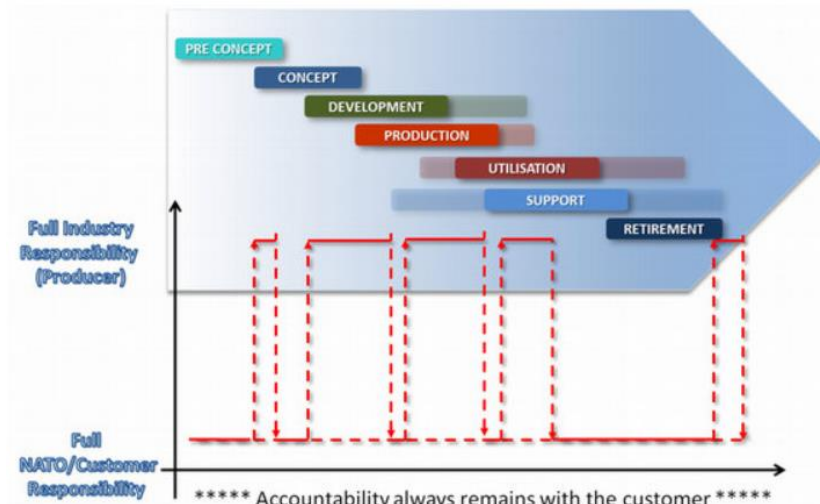


Figura 10 - Etapas de desenvolvimento de um projeto militar naval. [34]

Atendendo a que esta dissertação trata do desenvolvimento de um veículo anfíbio existe a necessidade de introduzir alguns conceitos de estabilidade estática.

## 2.2. Estabilidade

Antes de se analisar a estabilidade de um corpo submerso num fluido começa-se por estudar a sua flutuabilidade tendo por base o princípio de Arquimedes.

### 2.2.1. Princípio de Arquimedes

Este princípio invoca que para todo o corpo submerso num fluido sofre, por parte do mesmo, uma força vertical ascendente, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Arquimedes foi quem estabeleceu este princípio ao verificar que um corpo mergulhado em água se torna mais leve devido a uma força, exercida pelo líquido sobre o corpo, vertical e para cima, que alivia o peso do corpo. Essa força, do líquido sobre o corpo, é denominada de Impulsão. Portanto, sobre um corpo que se encontra imerso num líquido, atuam duas forças: a força Peso, devido à aceleração da gravidade, e a força de Impulsão, devido à interação do líquido com o corpo **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Assim, quando um corpo está totalmente imerso num líquido, podemos ter as seguintes condições:

- Se este permanecer parado no ponto onde foi colocado, a intensidade da força de impulsão é igual à intensidade da força Peso ( $I = P$ ), ver Figura 115 a);
- Se o corpo se afundar, a intensidade da força de impulsão é menor do que a intensidade da força Peso ( $I < P$ ), ver Figura 115 b);
- Se por sua vez for levado para a superfície, a intensidade da força de impulsão é maior do que a intensidade da força Peso ( $I > P$ ), ver Figura 115 c).

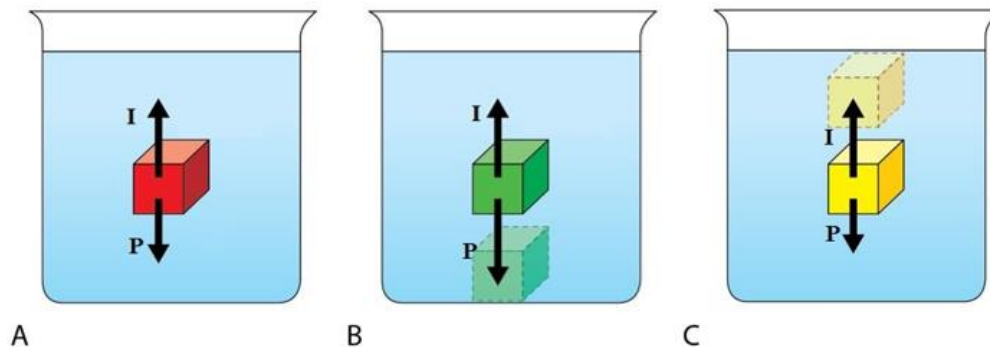


Figura 11 - Princípio de Arquimedes. [35]

No caso dos navios (e outros corpos flutuantes), a sua massa é também referida como deslocamento, que é definido como o número de toneladas de água deslocada pelo seu volume imerso. Desta forma, o valor de deslocamento de uma embarcação pode ser obtido multiplicando o seu volume imerso pela densidade da água.

Assim, o centro de gravidade de um navio é definido como sendo o ponto onde todo o peso do navio está aplicado e o centro de impulsão de um navio é o centro geométrico do volume imerso do navio num determinado instante que corresponde ao ponto de aplicação da força de impulsão que a água exerce sobre o navio, e atua verticalmente de baixo para cima. A posição do centro de impulsão altera-se constantemente à medida que o navio tem movimentos de balanço, e/ou de cabeceio e/ou de arfagem, ao contrário do centro de gravidade que se mantém constante (desde que não haja movimentos significativos de pesos no seu interior).

### 2.2.2. Estabilidade Transversal

A estabilidade transversal dos corpos flutuantes está fundamentalmente relacionada com a posição relativa entre estes dois pontos (centro de gravidade e centro de impulsão), quando o navio sofre adornamentos. Estabilidade transversal é um termo utilizado para

descrever a capacidade de um navio para retornar à posição de direito (inclinação transversal=0°), depois de ter sido forçado a adornar por uma força exterior, e.g., vento.

Considerando que um navio é adornado devido a uma força exterior, assim que a força exterior deixa de atuar, o navio retornará à posição inicial devido ao momento endireitante resultante da não colinearidade das linhas de ação do peso e da impulsão. O braço endireitante é definido como a distância horizontal, medida em metros, entre o centro de gravidade (G) e a linha vertical de ação da impulsão (Bf) que atua a partir do centro de impulsão (B1) quando o navio adorna, tal como representado na Figura 16.

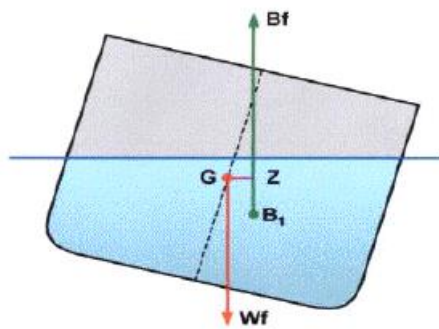


Figura 12 - Braço endireitante. [35]

Através do braço endireitante (GZ), é possível determinar o momento endireitante do navio sabendo o seu deslocamento, como:

$$\text{Momento Endireitante} = \overline{GZ} \times \text{Deslocamento}. \quad (1)$$

O metacentro, um indicador relativamente importante na avaliação da estabilidade, pode ser definido como o ponto em relação ao qual o centro de impulsão varia, no caso de pequenas inclinações (< 10°), dado que o centro de impulsão varia, tal como referido anteriormente, consoante a inclinação e a oscilação da embarcação. Esta variação traça uma curva, sendo o centro desta, designada como o metacentro, Figura 17.

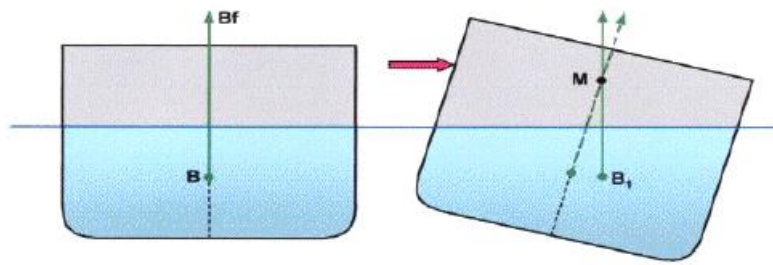


Figura 13- Metacentro. [35]

Determinado o metacentro, é possível determinar a altura metacêntrica, Figura 18, que pode ser definida como a distância vertical entre o centro de gravidade do navio (KG) e metacentro inicial transversal (KM), como:

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG}. \quad (2)$$

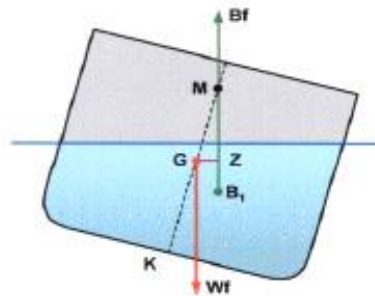


Figura 14 - Altura metacêntrica transversal. [35]

O metacentro e, conseqüentemente a altura metacêntrica, são conceitos essenciais para a avaliação da estabilidade de corpos flutuantes. Estes são conceitos fundamentais para a teoria de estabilidade de corpos flutuantes, sendo as suas primeiras referências encontradas em obras do século XVIII como “Tratado do Navio” (1746) e “Ciência Naval, tratado de construção” (1749) de, respetivamente, Pierre Bourguer e Leonhard Euler. [14]

Esta distância é relevante para a determinação da estabilidade inicial do navio, ou seja, da estabilidade da embarcação para pequenos ângulos de adorno na medida em que: se o centro de gravidade subir, o braço endireitante diminui, bem como o momento endireitante, e o navio torna-se menos estável (menor altura metacêntrica). Se o centro de gravidade baixar, o braço endireitante aumenta, e conseqüentemente também o momento endireitante, e o navio torna-se mais estável (maior altura metacêntrica)[13].

## 2.3. Propulsão

Estando assegura a estabilidade do veículo segue-se uma breve descrição dos fundamentos relacionados com os sistemas propulsores terrestres e marítimos assim como o fornecimento/armazenamento da energia que é realizado através de baterias.

### 2.3.1. Motores Elétricos para propulsão terrestre

Usualmente, e no contexto desta dissertação em particular, considera-se um motor elétrico que converte a energia elétrica proveniente de uma ou mais baterias em energia mecânica que impulsiona o veículo. Atendendo a que os motores elétricos são relativamente mais eficientes, mais compactos, mais leves, menos dispendiosos e exigem menos manutenção em comparação com motores de combustão interna, este torna-se uma opção inequívoca para a presente aplicação. Como a escolha do tipo de motor elétrico depende principalmente da aplicação de seguida apresenta-se a Tabela 1 que lista os tipos de motores elétricos mencionando as suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Comparação entre motores elétricos. [15]

	Vantagens	Desvantagens
Monofásico AC	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bom para aplicações de baixa potência</li><li>• Fácil manutenção</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Necessita de um inversor</li><li>• Menor eficiência do que um motor multifásico</li><li>• Potência de entrada descontínua</li></ul>
Multifásico AC	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bom para aplicações de alta potência</li><li>• Boa eficiência</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mais caro do que um motor monofásico</li><li>• Necessita de um inversor</li></ul>
DC	<ul style="list-style-type: none"><li>• Controlo simples</li><li>• Menor aquecimento</li><li>• Não necessita de inversor</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mais caro do que um motor AC</li></ul>
Com escovas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Controlo e manutenção simples</li><li>• Mais barato do que um motor sem escovas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Menor fiabilidade</li><li>• Necessita de manutenção contínua</li><li>• Baixa relação velocidade/binário</li></ul>
Sem escovas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amplitude de velocidades elevada</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema de controlo mais complexo</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa relação velocidade/binário</li> <li>• Menos manutenção</li> <li>• Eficiência elevada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais caro do que um motor com escovas</li> </ul>
--	---

É de notar que, dos tipos de motores existentes referidos na tabela anterior, os motores sem escovas apresentam a eficiência mais elevada e menores custos de manutenção, apesar de requererem um investimento inicial maior para a sua aquisição.

### 2.3.2. Dimensionamento dos Motores Elétricos para Propulsão Terrestre

Para auxiliar a escolha do tipo de motor elétrico e do motor a utilizar na propulsão terrestre, torna-se necessário estimar a potência e binário requeridos. Assim sendo, consideram-se os seguintes parâmetros [16]:

- Massa total do veículo: massa do veículo ( $m_V$ ) + massa da carga ( $m_L$ );
- Velocidade nominal máxima ( $v_N$ );
- Ângulo máximo de subida ( $\theta$ );
- Diâmetro exterior das rodas ( $D_W$ ).

Tendo em consideração a velocidade nominal, e o diâmetro exterior da roda, começa-se por calcular a velocidade de rotação das rodas,  $N_T$ , que em unidades de rotações por minuto pode ser expressa por:

$$N_T = \frac{60 v_N}{\pi D_W}. \quad (3)$$

De seguida, considerando que a contribuição da fricção entre componentes é desprezável, estimam-se a potência total ( $P_T$ ) e o binário total ( $T_T$ ) do motor como:

$$P_T = F_T v_N, \quad (4)$$

$$T_T = \frac{1}{2} \times \frac{D_W}{2} F_T, \quad (5)$$

onde,  $F_T$  é a força total requerida para vencer as forças de atrito (entre as rodas e a superfície) e da gravidade durante uma subida com um ângulo máximo inclinação  $\theta$ , expressa por:

$$F_T = (m_V + m_L) g (\sin \theta + \mu \cos \theta), \quad (6)$$

onde,  $g$  é a aceleração gravítica e  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre a roda do veículo e o terreno [17].

Com base nas Eqs. (3) a (6), é possível estimar a potência e binário totais requeridos para os motores do veículo, que devem cumprir as especificações do projeto conceptual e assim permitir avançar para a seleção de um motor existente no mercado.

## 2.4. Baterias

Para alimentar os motores previamente estabelecidos recorre-se a baterias na medida em que o veículo aqui desenvolvido é totalmente elétrico. Uma bateria é um dispositivo eletroquímico capaz de converter energia química em energia elétrica com uma eficiência relativamente elevada. Usualmente as baterias são constituídas por três componentes principais: um elétrodo positivo (cátodo), um elétrodo negativo (ânodo) e um eletrólito. Durante a descarga, os eletrões fluem através do eletrólito do ânodo para o cátodo onde ocorre a oxidação e a redução, respetivamente. Durante o processo de carregamento, ocorre a reação inversa.

Nesta dissertação, o principal parâmetro utilizado na escolha das baterias é a energia específica, que traduz a capacidade energética da bateria por unidade de peso, o que afeta diretamente a autonomia e a massa total do veículo.

Contudo, de seguida são referidos outros parâmetros que influenciam o tamanho da bateria, que é relevante dado a limitação de espaço no interior do veículo, assim como o número de ciclos de carga.

- **Energia específica** [e] - Capacidade energética da bateria por unidade de peso (Wh/kg). Depende principalmente da química celular e dos componentes da bateria que devem ser otimizados para determinados objetivos de desempenho energético. Uma pequena energia específica significa que é necessário um peso adicional para atingir uma capacidade energética.
- **Densidade energética** [v] - Capacidade energética da bateria por unidade de volume (Wh/L).

- **Potência específica** [ $p$ ] - Potência da bateria por unidade de peso (W/kg). Determina o peso da bateria necessário para atingir um determinado objetivo de desempenho de potência.
- **Tensão nominal** [ $V$ ] - A tensão de referência da bateria em volts (V). Às vezes também considerado como a voltagem ideal da bateria.
- **Capacidade** [ $C$ ] - A capacidade coulométrica disponível, em Ampere-hora (Ah). A capacidade é calculada multiplicando a corrente de descarga pelo tempo de descarga e diminui com o aumento da taxa  $C$ .
- **Capacidade energética** [ $E$ ] - A energia total da bateria disponível, em Watts-hora (Wh). Tal como a capacidade coulométrica, a capacidade energética diminui com o aumento da taxa  $C$ .

Atualmente existem diversos tipos de baterias que são usualmente referenciadas de acordo com os materiais constituintes, e.g., sódio-enxofre, lítio-enxofre, iões de lítio, entre outros.

#### 2.4.1. Baterias de Iões de Lítio vs. Ácido-Chumbo

As baterias de iões de lítio têm recebido significativa atenção dentro da indústria de baterias sendo atualmente as mais utilizadas em aplicações similares à proposta nesta dissertação. Possuem diversas vantagens como principal fonte de energia para veículos elétricos comparativamente às baterias de ácido-chumbo, ver Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre baterias de Ácido-Chumbo e de iões de Lítio. [15]

Caraterísticas	Ácido-Chumbo	Iões de Lítio
Densidade energética (Wh/L)	54 - 95	250 - 360
Energia específica (Wh/kg)	30 - 40	110 - 175
Profundidade de descarga	50%	80%
Temperatuda de carregamento	-40°C - 27°C	-20°C - 55°C
Eficiência	75%	97%
Vida útil (Anos)	1,5 - 2	5 - 7
Custos de manutenção	SLA = 2%	N/A
	VRLA = 10%	
Custo da bateria (\$/kWh)	120	600

Dos parâmetros apresentados na Tabela 2, verifica-se que comparativamente com as baterias de ácido-chumbo as principais vantagens das baterias de iões de lítio que se

destacam são a elevadas densidade energética e energia específica, a baixa manutenção e maior tempo de vida [18].

### 2.4.2. Dimensionamento das Baterias

Para determinar a capacidade energética das baterias de forma a se conseguir cumprir com a autonomia estabelecida pelas especificações do projeto conceptual é necessário conhecer os seguintes parâmetros [15]:

- Potência ( $P_T$ ) e tensão ( $V$ ) do motor;
- Rendimento dos motores ( $\eta_m$ );
- Rendimento de descarregamento da bateria ( $\eta_b$ );
- Autonomia ( $h$ ).

Assim, a capacidade energética da bateria ( $E$ ) pode ser obtida por:

$$E = \frac{P_T * h}{\eta_m * \eta_b}, \quad (5)$$

e a capacidade da bateria ( $C$ ), para que se cumpra a autonomia especificada, pode ser obtida por:

$$C = \frac{E}{V}. \quad (6)$$

### 2.4.3. Análise CFD (*Ansys Fluent*)

O estudo de escoamentos de fluidos “reais” requer normalmente, substanciais tratamentos teóricos e numéricos sendo numa fase inicial de projeto frequentemente simplificados e aplicados a situações idealizadas. Usualmente, os dois principais obstáculos na mecânica dos fluidos são a geometria dos corpos e a viscosidade do fluido. Para tratar problemas complexos, é possível aplicar técnicas numéricas de simulação computacional, por exemplo, Dinâmica de Fluido Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) que foi desenvolvida durante a segunda metade do século XX [19].

Nesta dissertação, para as análises de simulação numéricas de fluidos, é utilizado o software *Ansys Fluent* CFD. Este software baseia-se em equações diferenciais parciais,

num volume de controlo, com base no método de volumes finitos e utiliza o algoritmo SIMPLE [20].

Assim, para um fluido newtoniano a equação de conservação de massa pode ser expressa como [20]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0, \quad (7)$$

onde,  $\vec{U}$  é a velocidade e  $\rho$  a densidade mássica do fluido.

Para o fluido incompressível ( $\partial \rho / \partial t = 0$ ), pelo que a equação de conservação em massa é simplificada a:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0. \quad (8)$$

A equação de Navier-Stokes pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla (\rho \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (9)$$

onde,  $p$  é a pressão estática,  $\bar{\tau}$  o tensor das tensões,  $\rho g$  a força gravitacional e  $F$  são os outros termos podem surgir de resistência e fontes. Note-se que se  $p$  estiver relacionado com a pressão hidrostática local relativa, o termo de força gravitacional do corpo não aparece na Eq. (9).

O tensor das tensões ( $\bar{\tau}$ ), apresentado na equação anterior pode ser expresso como:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U} I \right], \quad (10)$$

onde,  $\mu$  é a viscosidade molecular em [Kg/s m], e  $I$  é o tensor das tensões unitário.

Para fluidos incompressíveis e considerando a Eq. (8), uma vez que o volume de um fluido incompressível não varia, a Eq. (10) pode ser reescrita como:

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T). \quad (11)$$

Os modelos de turbulência no *Ansys Fluent* baseiam-se nas médias de Reynolds das equações que regem. As variáveis como a velocidade, a pressão e outras quantidades escalares são decompostas na média (média do conjunto ou na média do tempo) e nos componentes flutuantes:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (12)$$

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi', \quad (13)$$

onde,  $u_i$ ,  $\bar{u}_i$  e  $u'_i$  são a velocidade instantânea, a velocidade média e as flutuações, respetivamente, e  $\varphi$  representa a pressão e outras entidades escalares.

Esta decomposição é implementada nas equações que são posteriormente submetidas a uma média temporal conduzindo ao aparecimento de novos termos.

#### 2.4.4. Análises estruturais computacionais

O *Altair SimSolid*, é um software de análise estrutural destinado a ser utilizado na fase de conceção. Este combina a simplificação da geometria e a não necessidade de requerer malha, permitindo assim, a análise de estruturas complexas com diversos componentes num curto espaço de tempo. O motor computacional *SimSolid*, conhecido como *solver*, é uma tecnologia de simulação desenvolvido com base em extensões inovadoras da teoria das aproximações externas (*theory of external approximations*). As aproximações externas são vistas como uma generalização do Método dos Elementos Finitos (FEM) sendo que permite o uso arbitrário de formas geométricas como "elementos finitos" e funções básicas que se aproximam do campo de interesse no "elemento" podem ser de classe arbitrária e são independentes da forma do "elemento" [21].

Na Análise de Elementos Finitos (FEA), os Graus De Liberdade (GDL) são definidos como as variáveis que devem ser especificadas para definir o processo. São as principais incógnitas nas Equações que constituem um modelo de elementos finitos [22] e [23]. Em comparação com a FEA tradicional, o solver do *SimSolid* não utiliza GDL pontuais. Os seus GDL são pontos com suporte geométrico em várias formas, tais como volumes, áreas entre outras. Esta capacidade permite lidar com imperfeições geométricas e/ou de contacto, por exemplo, penetrações e lacunas, fazendo do *SimSolid* uma tecnologia que permite operar diretamente no modelo original e nos modelos CAD não simplificados, tal como expresso em [24].

A tecnologia do *SimSolid* pode introduzir um nível mais elevado de precisão de solução utilizando a análise adaptativa *multi-pass*. A análise adaptativa pode ser feita a

nível global ou local. Utiliza passes (iterações) de soluções múltiplas, análise de erros locais e globais e enriquecimento local adaptativo para garantir a precisão do resultado..

As condições necessárias e suficientes para uma aproximação externa de elementos finitos [25], baseiam-se na continuidade estendida, que contempla funções de aproximação definidas dentro do elemento. Estas funções de fronteira geram GDL de fronteira que resultam em integrais do produto de funções de fronteira nas funções de elementos finitos na fronteira dos elementos finitos definidos como:

$$\int_{\Gamma} u \gamma U d\Gamma = 0, \quad (14)$$

onde,  $\gamma$  é a fronteira do elemento finito,  $U$  são as funções de aproximação definidas no elemento e  $u$  são os deslocamentos.

Estes deslocamentos são usualmente utilizados nas análises estruturais, que para um sistema discreto com  $N$  GDL em equilíbrio dinâmico, pode ser descrito por:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = f, \quad (15)$$

onde,  $M$ ,  $C$  e  $K$  são as matrizes de massa, amortecimento (viscoso) e rigidez globais, respetivamente,  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  e  $u$  são os vetores aceleração, velocidade e deslocamento, respetivamente, e  $f$  é o vetor de forças externas aplicadas.

Para o caso em que as forças exteriores aplicadas são estáticas, a Eq. (15) reduz-se a:

$$K u = f. \quad (16)$$

Como base nos deslocamentos obtidos, podem-se determinar diversos parâmetros de interesse estrutural, e.g., tensões, de forma a aferir a integridade da estrutura.

A tensão em qualquer ponto infinitesimal de um corpo pode ser representada pelo tensor das tensões definido como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

em que  $\sigma_{ii}$  são as a tensões normais (sendo que  $i$  estabelece a direção,  $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) e  $\tau_{ij}$  são as a tensões de corte, ver Figura 19.

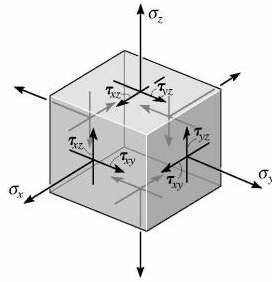


Figura 15 - Componentes do tensor das tensões: Tensões normais  $\sigma_{ii}$  e de corte  $\tau_{ij}$ . [36]

Usualmente, utilizam-se critérios de cedência de forma a prever as condições para as quais se inicia a deformação plástica ou a cedência do corpo quando este está sujeito a qualquer tipo de sollicitação. Um critério baseado na observação experimental e com larga aplicação em problemas de engenharia é o critério de *Von-Mises* em que a tensão de *Von-Mises* pode ser expressa por:

$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

Segundo o critério de *Von-Mises*, em nenhum ponto do corpo as tensões calculadas devem produzir valores superiores à tensão de *Von-Mises*, i.e.,  $\sigma < \sigma^*$ . Assim sendo, em qualquer ponto do corpo a tensão de *Von-Mises* de ser inferior à tensão de cedência do material ( $\sigma^* < \sigma_{ced}$ ) de forma a garantir que o corpo se mantém no regime elástico onde apenas sofre deformações elásticas, i.e., o corpo retorna à sua configuração original após a remoção da carga aplicada.

Tendo por base todos os fundamentos anteriormente apresentados, de seguida são apresentadas as metodologias aplicadas em cada fase do projeto conceptual do veículo.

### 3. Metodologia

Neste capítulo são descritas as principais metodologias utilizadas para o projeto e desenvolvimento conceptual do veículo.

#### 3.1.Planeamento

O *design* e desenvolvimento de um produto, tal como descrito no subcapítulo 2.1., tem início na fase zero, intitulada de planeamento, onde se traça um plano com o objetivo de identificar os objetivos, avaliar a concorrência e as tecnologias atualmente disponíveis e delinear a estratégia a adotar.

Neste sentido, apresenta-se na Figura 16, um fluxograma com as diversas fases definidas como necessárias para o desenvolvimento conceptual do veículo aqui proposto.



Figura 16 - Diagrama das fases do projeto conceptual do veículo anfíbio não tripulado

Começa-se assim, por identificar as necessidades e estabelecer as especificações alvo do veículo. Prossegue-se com um estudo do mercado, conceptualização e desenvolvimento do projeto que por fim conduzem às especificações finais do veículo.

#### 3.2.Desenvolvimento Conceptual

Concluída a “fase zero” e estabelecida uma ordem de objetivos a cumprir, inicia-se desta forma o desenvolvimento do projeto. As fases do mesmo que foram estabelecidas na fase anterior são então descritas no presente subcapítulo.

##### 3.2.1. Necessidades

A partir das motivações para este trabalho expostas na introdução, ver subcapítulo 1.2, identificam-se as necessidades concretas que motivam a criação e desenvolvimento desta dissertação em geral e deste veículo em particular. Pelo que é descrito na DEM 2018 REV 2021, as necessidades identificadas são principalmente fruto dos objetivos estabelecidos pelas LA da diretiva.

### **3.2.2. Especificações-alvo**

As especificações-alvo, ou requisitos (operacionais), estão assim diretamente relacionadas com as necessidades identificadas para o veículo, fornecendo uma descrição precisa das características que o veículo possui, ou seja, são a tradução das necessidades identificadas em parâmetros técnicos específicos. Estas especificações são nesta fase refinadas para serem consistentes com os objetivos definidos e com os constrangimentos associados ao conceito de um veículo terrestre anfíbio não tripulado.

### **3.2.3. Estudo de Mercado**

A geração de novos conceitos inclui uma mistura de uma forte componente de pesquisa externa com a resolução criativa de problemas e análise de constrangimentos associados ao veículo a desenvolver. O estudo do atual estado da arte é importante para que se estabeleça um melhor entendimento das atuais soluções disponíveis, determinar as principais características comuns entre este tipo de veículos e analisar os avanços tecnológicos nesta área.

Assim, nesta fase o objetivo consiste em reunir informação, tanto imagens como as características, dos veículos atualmente disponíveis no mercado que são projetados para missões similares, ou com capacidades semelhantes, ao veículo que se pretende aqui desenvolver.

### **3.2.4. Conceptualização e desenvolvimento do veículo**

Tendo como referência as características dos veículos analisados no estudo de mercado, sempre com principal foco nas características comuns, recorre-se às ferramentas disponíveis no *software* de CAD, mais especificamente ao *SolidWorks*, para criar os modelos tridimensionais (3D) dos diferentes componentes que compõem o veículo, e.g., o casco.

Note-se que é nesta fase que se define o material de cada componente permitindo que após montagem se possa utilizar o modelo CAD do veículo em simulações numéricas ou se obtenha uma estimativa da respetiva massa total e da localização do seu centro de gravidade que são utilizados para estimar parâmetros de interesse, e.g., estabilidade transversal (ver, subcapítulo 2.2.2).

### 3.2.4.1. Locomoção Terrestre

A escolha e conceptualização da configuração considerada mais adequada para a locomoção terrestre do veículo tem por base a avaliação das duas configurações mais comuns, i.e., lagartas ou rodas, para os veículos terrestres contemplados no estudo do mercado, ver subcapítulo 3.2.3, considerando que cumprem as especificações alvo estabelecidas, ver subcapítulo 3.2.2.

Para auxiliar na tomada de decisão utilizam-se considerações empíricas que aferem as principais vantagens e desvantagens inerentes a cada sistema [26]. A partir da informação adquirida, e tendo em conta a aplicação e os meios onde o veículo terá de atuar, toma-se uma decisão.

Assim, consideram-se três diferentes configurações comumente utilizadas na aplicação de rodas como meio de tração:

- Um motor elétrico para cada roda;
- Um único motor que fornece a potência às rodas através de um diferencial;
- Rodas com motores elétricos incorporados.

Desta forma, é também necessário determinar qual destas opções se adequa melhor ao veículo. Uma vez que aqui se consideram três opções, a tomada de decisão é realizada com base no método de análise multicritério adaptado da dissertação de mestrado do 2TEN EN-MEC Pereira Lopes do ano letivo de 2017/2018 [27].

Portanto, para a determinar a “melhor” das três configurações consideradas, identificam-se algumas das características mais relevantes, ver Tabela 3, atribuindo-lhes um determinado coeficiente de importância, onde 1 corresponde à característica menos importante e o 4 à característica mais importante.

Tabela 3 - Coeficientes de importância das características requeridas para a tração terrestre:

1- menos importante e 4- mais importante.

Característica	Coeficiente
Custo	4
Aplicabilidade	3
Redundância	2
Disponibilidade no mercado	1

Com base nestes coeficientes, constrói-se uma tabela que permite auxiliar a seleção, qualitativamente, da configuração de propulsão terrestre mais adequada às especificações anteriormente definidas. Assim, cada configuração tem, para cada característica, um valor atribuído de 1 a 5, de acordo com o grau de desempenho.

### 3.2.4.2. Dimensionamento dos motores terrestres e baterias

Para o tipo de propulsão terrestre previamente estabelecida, cabe agora dimensionar os motores que a compõem. Para tal, a metodologia adotada contempla um processo iterativo que recorre à aplicação e resolução das equações descritas no subcapítulo 0.

Este processo é implementado numa folha de cálculo, onde se discriminaram as variáveis e constantes, e, em seguida, programam-se as equações de forma a obterem-se os valores de potência e binário requeridos para os motores.

De forma a analisar e dimensionar os motores para deslocação terrestre e as respetivas baterias para o veículo projetado, começou-se por definir um perfil de missão com o objetivo de simular e avaliar a aplicação do veículo num deslocamento em terra durante a sua utilização no desempenho de uma missão.

Assim, em primeiro lugar, define-se um perfil de missão que consiste num percurso unicamente terrestre, ver Figura 17, sobre uma superfície com coeficiente de atrito relativamente elevado. O trajeto tem duas subidas e duas descidas com  $15^\circ$  de inclinação percorridas a 15 km/h e, os segmentos planos, são percorridos à velocidade máxima projetada de 20 km/h.

Recorrendo ao processo iterativo que recorre à aplicação e resolução das equações descritas no subcapítulo 2.3 programado no *Microsoft Excel* (Apêndice C), avalia-se o desempenho do veículo projetado ao cumprir o perfil de missão.



Figura 17 - Perfil de Missão 1 (terrestre).

Desta forma, através destes cálculos, é possível determinar também a capacidade necessária que as baterias têm de apresentar para respeitar a autonomia pretendida para o veículo.

Para tal, recorrendo às equações descritas no subcapítulo 2.4, dimensionam-se as baterias determinando as distâncias para o perfil de missão anteriormente mencionado e, conseqüentemente, verifica-se se a autonomia mínima requerida é alcançada [15].

### **3.2.4.3. Estabilidade**

Tendo um modelo concetual do veículo estabelecido, segue-se a determinação de alguns dados sobre a estabilidade intacta do veículo que é realizada recorrendo ao *software Maxsurf (Modeler Advanced)*.

Em primeiro lugar, é necessário guardar o modelo criado em *SolidWorks* num formato compatível com o *Maxsurf*, e.g., formato STEP.

Em seguida, importa-se o modelo do veículo para o *Maxsurf* e garantido que o mesmo foi carregado com sucesso, define-se a altura da linha de água, que iguala o deslocamento do modelo à massa total projetada, e obtém-se o relatório hidrostático.

Por fim, utilizando o *Maxsurf Stability Advanced*, definem-se os incrementos de calado e de deslocamento, obtendo-se o gráfico de carenas direitas.

### **3.2.4.4. Dimensionamento dos motores para água**

Para dimensionar a potência necessária para fazer com que o veículo alcance a velocidade especificada, recorre-se ao *software Maxsurf (Resistance)* e *Ansys Fluent*.

Em primeiro lugar, recorrendo ao *Maxsurf*, é importado o modelo do veículo tal como foi feito no ponto anterior. No entanto, uma vez que a ferramenta *Resistance* deste *software* tem uma capacidade limitada de processar um número elevado de faces é necessário utilizar o modelo da estrutura do veículo sem incluir as rodas. Uma vez que é um *software* destinado ao estudo e projeto de navios, o cálculo da resistência é realizado analiticamente, sendo calculado neste caso recorrendo ao método de Holtrop [28]. Por conseguinte, é possível obterem-se os valores de potência para cada velocidade até à velocidade máxima especificada.

Por outro lado, e uma vez que o *software Maxsurf* apresenta algumas limitações neste âmbito, é também utilizado o *software Ansys Fluent*, que possibilita a simulação com o modelo completo do veículo.

Neste *software*, começa-se por importar o ficheiro CAD do veículo. Em seguida, é criado um volume em volta do modelo do veículo que define o domínio fluido para a simulação, ver Figura 22. Por conseguinte, é subtraído a este volume o modelo do veículo de forma a ficar com a geometria onde será criada a malha do domínio fluido.

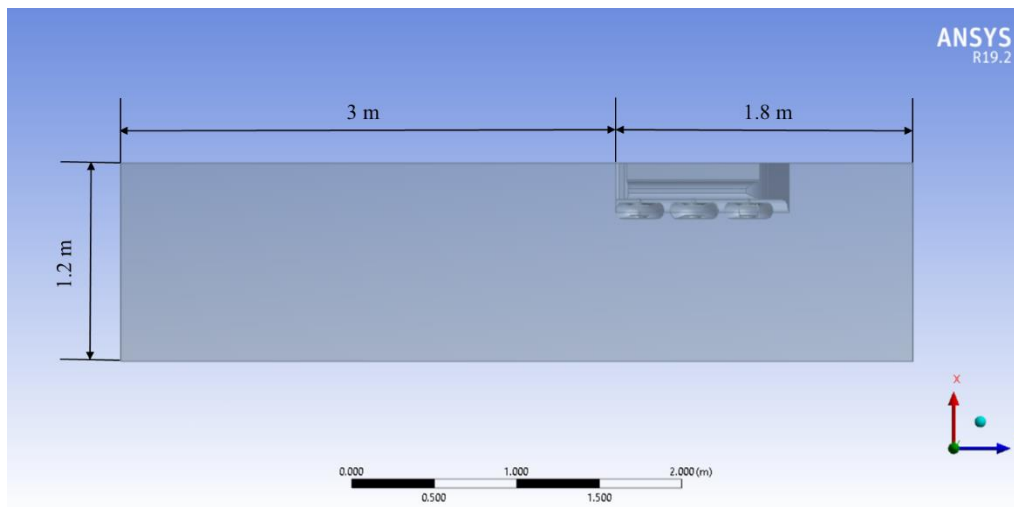


Figura 18 - Construção da geometria para análise CFD, *Ansys Fluent*.

Para além disso, cria-se outra geometria que intersesta a anteriormente criada e que envolve o veículo. Este passo tem por fim criar um volume que servirá de “*Body of Influence*”, ver Figura 23, na fase de dimensionamento da malha.

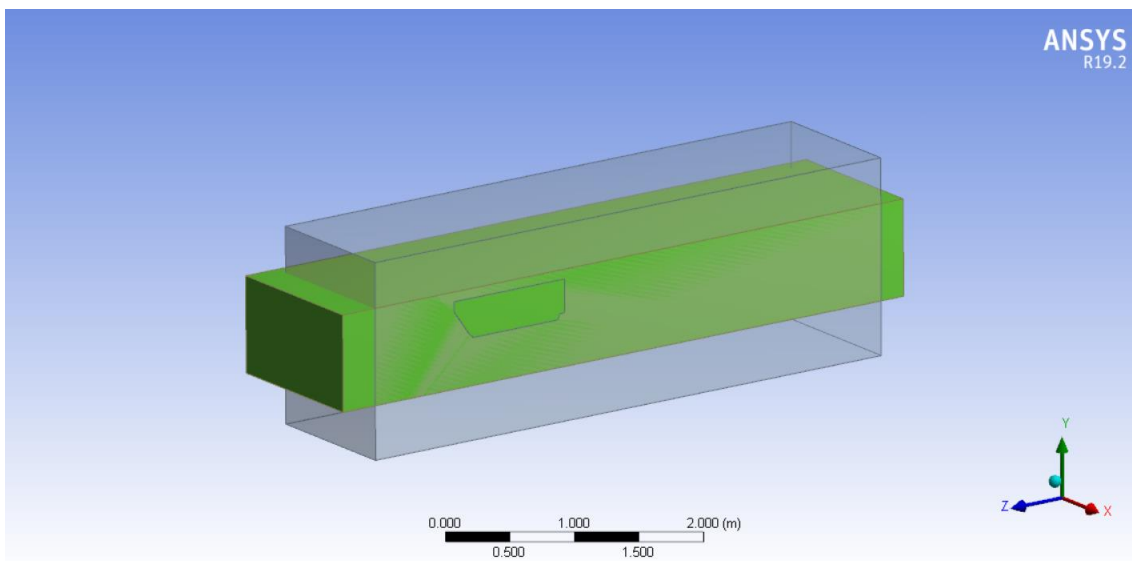


Figura 19 - Construção da geometria para *Body of Influence*, *Ansys Fluent*.

Em segundo lugar, parte-se para a criação da malha. Nesta fase, começa-se por inserir o dimensionamento do domínio fluido com *Body Sizing*, onde se seleciona o primeiro volume criado no passo anterior. Depois, como explicado anteriormente, define-se a segunda geometria criada como *Body of Influence*, ver Figura 23. Esta definição permite ao programa gerar uma malha com o refinamento mais adequado e preciso na área de maior interesse para esta análise.

A face interna criada de quando se subtrai o veículo do volume envolvente é definida no dimensionamento da malha com a inserção do *Face Sizing*, ver Figura 24.

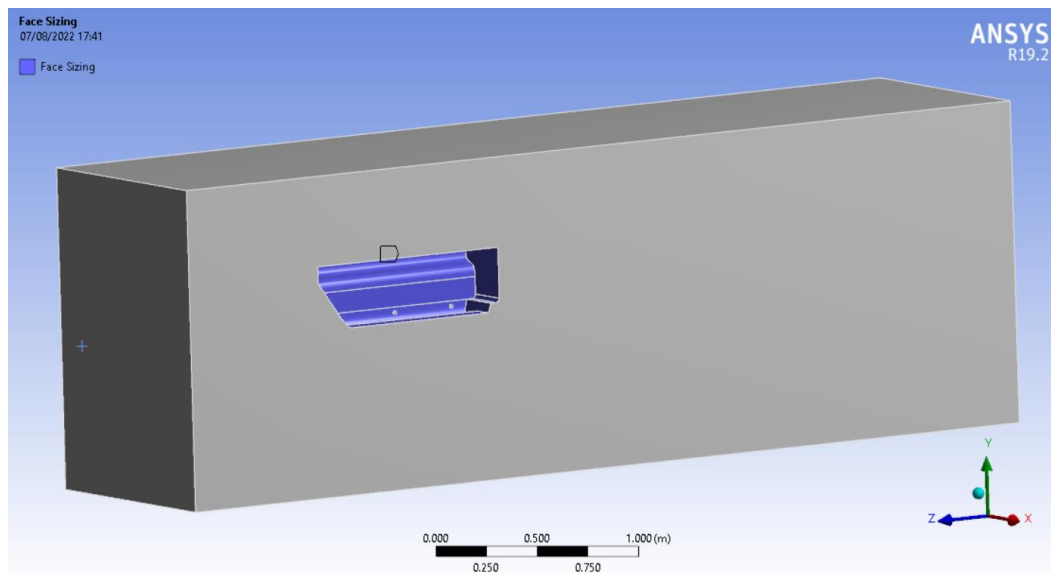


Figura 20 - Face do veículo anfíbio, *Ansys Fluent*.

Isto permite que a malha nesta face seja mais fina (elementos de menor dimensão) uma vez que é a parte mais complexa do volume construído, ver Figura 25. Note-se que, ao seguir esta metodologia, obtém-se uma precisão satisfatória nas zonas mais complexas do modelo permitindo obter resultados adequados em tempo útil, i.e., sem comprometer o desempenho computacional.

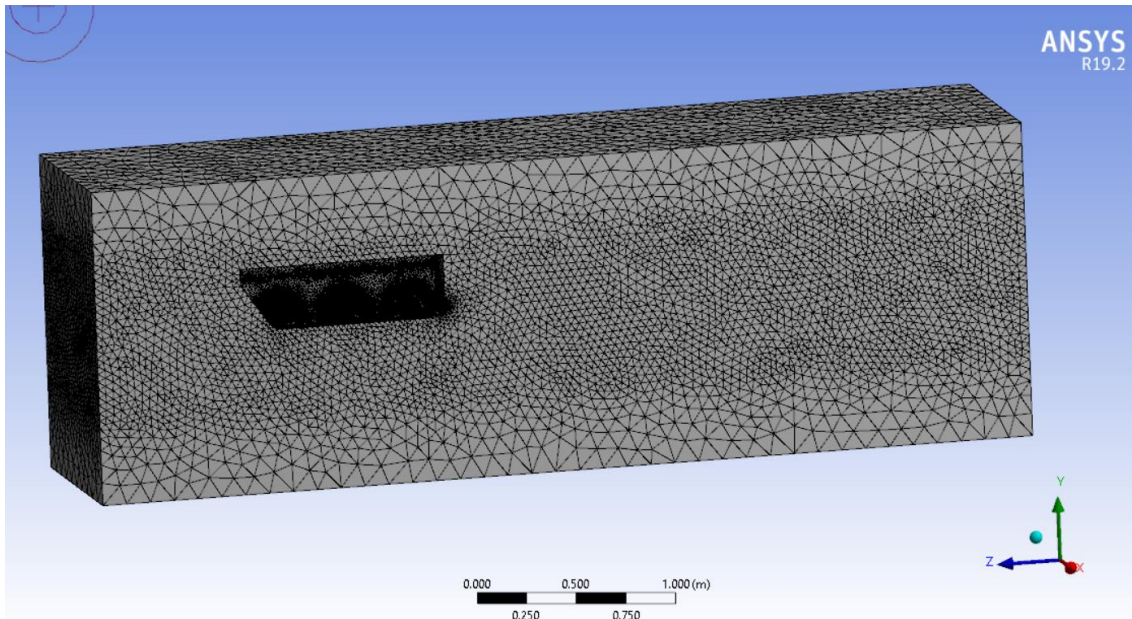


Figura 21 - Malha criada para análise CFD, *Ansys Fluent*.

De seguida, importa-se a malha criada para o *Fluent*, e definem-se os dois fluidos utilizados para a análise, ar e água, e as respetivas características. Na face posterior do sólido “*inlet*” e a face oposta “*outlet*”, introduz-se a velocidade pretendida para a análise, ou seja 8 nós, e a altura da linha de água. Por último, antes de se correr o *solver* do programa, é introduzido um valor máximo de 200 iterações, ver Figura 26.

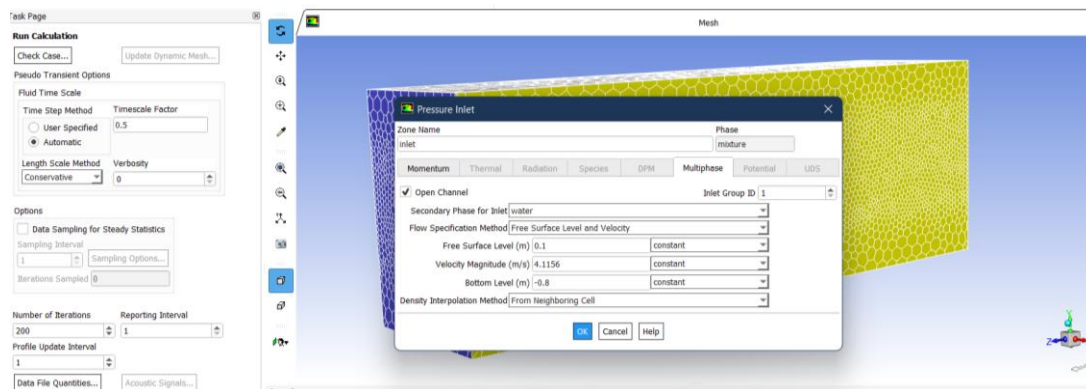


Figura 22 - Dados introduzidos para simulação CFD, *Ansys Fluent*.

O diagrama desta análise em *Ansys* está representado na Figura 27, sendo os valores da força de arrasto e outros resultados de interesse retirados posteriormente na janela de resultados.

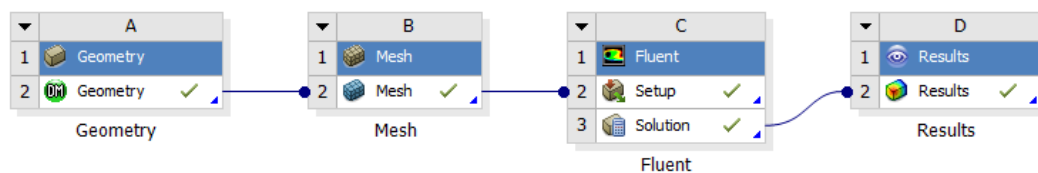


Figura 23 - Diagrama do estudo realizado no *software Ansys*.

Por último, com os dados de potência do dimensionamento obtidos através da metodologia referida nos parágrafos anteriores, é também necessário garantir que a autonomia estabelecida seja cumprida numa missão em que o veículo se deslocará maioritariamente dentro de água.

Para tal, o segundo perfil de missão determinado para a avaliar o desempenho do veículo, pretende que este percorra por 4 km a 20 km/h, uma superfície aproximadamente plana com um coeficiente de atrito de 0.6 (aproximadamente o da areia ou gravilha solta). Em seguida, transita para dentro de água, onde, apenas utilizando a propulsão dedicada para este meio, se desloca à velocidade máxima projetada de 8 nós. Por fim, realiza o mesmo percurso em terra percorrido no início. Desta forma, é também possível verificar se as baterias são suficientes para que se cumpra a autonomia pretendida, razão pela qual este perfil de missão considera o percurso em água à velocidade máxima apesar desta ser uma abordagem pouco usual, mas conservadora.

### 3.2.4.5. Análises Estruturais Estática e Dinâmica

Como complemento ao desenvolvimento conceptual deste Veículo Anfíbio Não Tripulado são realizadas análises estruturais estáticas e dinâmicas, ver subcapítulo 2.4.4, de forma a avaliar o *design* e algumas das escolhas tomadas na fase de conceptualização do veículo.

Desta forma, com o auxílio do *software Altair SimSolid* são contemplados os seguintes casos:

- a) Casco sujeito a uma carga estática que simula o peso das baterias e da *payload* (sensores e outros equipamentos);
- b) Veículo sujeito a cargas estáticas nas rodas para aferir o componente e a carga crítica (carga que origina uma tensão superior à de cedência);
- c) Veículo sujeito a cargas dinâmicas (degrau, meio seno e seno) para aferir o componente e a carga crítica;

Assim, começa-se por importar o ficheiro CAD do veículo para o *SimSolid* onde são aplicadas as condições de fronteira e respetivas cargas. É de notar que, para este estudo, foram assumidos os seguintes materiais (Anexo A – *Datasheet* Fibra de Carbono Zoltek™ PX35 P/TW28-50 e Anexo B – *Datasheet* Alumínio 7075 – T6):

- Casco: Fibra de carbono Zoltek™ PX35 P/TW28-50 ( $\sigma_{ced} = 4137 \text{ MPa}$ );
- Veio e jantes: Liga de alumínio 7075 T6 ( $\sigma_{ced} = 503 \text{ MPa}$ ).

Para o caso a), tal como é possível observar na Figura 28, são definidos como apoios os furos destinados ao acoplamento das rodas e definida uma carga na superfície onde se pretendem instalar as baterias com uma intensidade equivalente à carga resultante da massa total das mesmas.

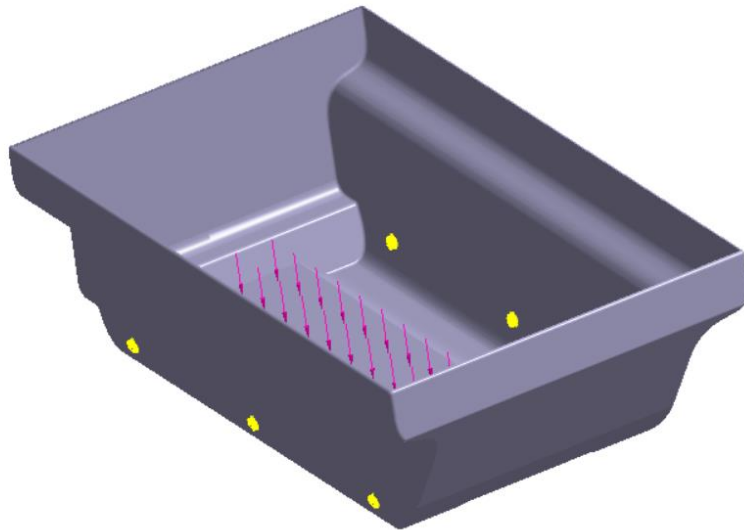


Figura 24 - Análise estrutural estática ao casco.

Em seguida, para a análise do caso b), é utilizado o modelo do veículo completo, ver Figura 28. É mantida a mesma carga aplicada no caso anterior que tem como objetivo representar as baterias e a *payload*, e, para além desta, é inserida uma carga aplicada nas seis rodas. A intensidade desta força é incrementada até que se atinja uma das tensões de cedência dos materiais considerados.

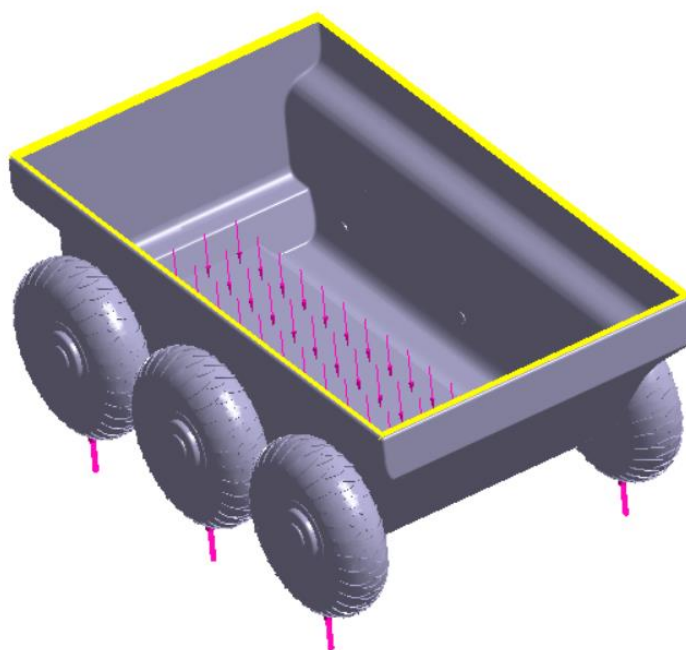


Figura 25 - Análise estrutural dinâmica ao veículo completo.

Por último, são realizadas análises estruturais dinâmicas, na quais se testam a aplicação de cargas dinâmicas aplicadas às rodas definidas por funções. As Figuras 30-32, ilustram as três funções aqui consideradas.

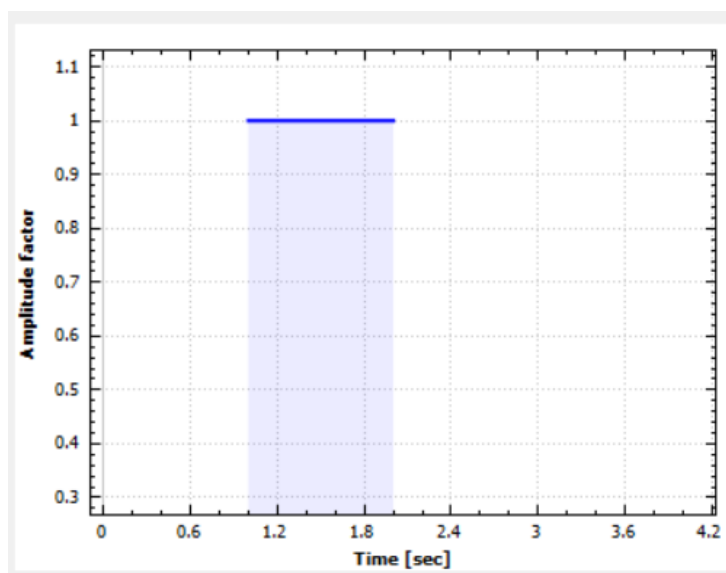


Figura 26 - Função degrau.

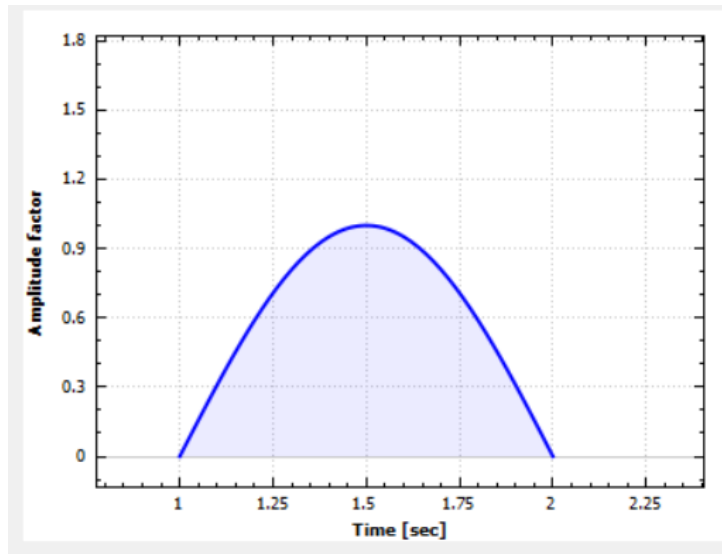


Figura 27 - Função meio seno.

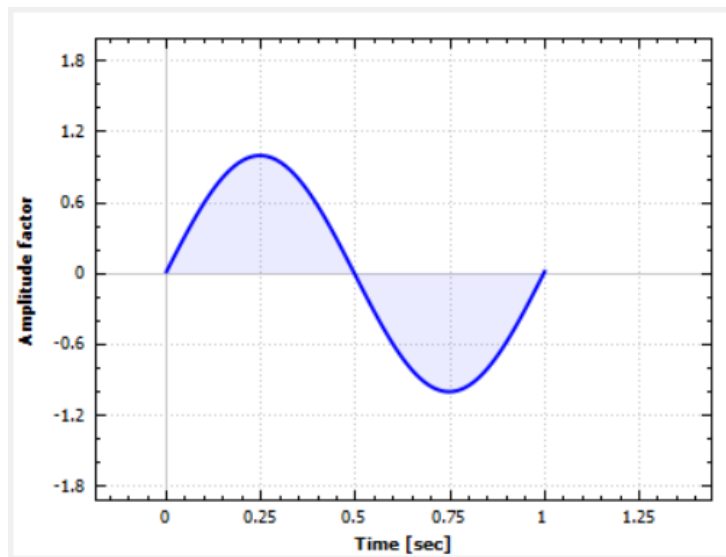


Figura 28 - Função seno.

Para cada função, define-se um fator de ampliação da força de 1 e uma duração de 1 segundo. Assim, é possível estimar as tensões provenientes destas solicitações e observar o comportamento estrutural dinâmico do veículo enquanto este se desloca.

Com base nas metodologias descritas de seguida apresentam-se os principais resultados obtidos no decorrer desta dissertação.

## **4. Resultados**

Tendo por base os fundamentos e metodologias apresentadas nos capítulos anteriores, neste capítulo são apresentados os resultados considerados mais relevantes obtidos no decorrer do desenvolvimento concetual do veículo anfíbio aqui desenvolvido.

### **4.1. Necessidades**

De acordo com a metodologia descrita em 3.2.1, as necessidades identificadas que este veículo ambiciona mitigar podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Apoiar e aumentar a capacidade em operações militares;
- Cumprir a sua missão de forma a diminuir o risco para todos os operacionais envolvidos;
- Capacidade de atuar de forma eficiente tanto em terra como em água;
- Veículo pequeno para que possa ser facilmente transportado e operado;
- Capacidade de equipar diversos tipos de sensores;
- Veículo de baixo custo de fabrico e operação.

Sendo as necessidades propostas para este projeto alcançadas será possível cumprir os OEs descritos anteriormente. Ao ter um veículo controlado remotamente com capacidade de atuar tanto em água como em terra, faz com que seja possível otimizar a presença da Marinha Portuguesa em todo o tipo de ações anfíbias e costeiras.

Para além disso, permite aumentar a prontidão das unidades operacionais, dando às mesmas um novo meio capaz de realizar missões de reconhecimento e vigilância sem colocar em risco os militares envolvidos.

Por último, ao haver a possibilidade de equipar diversos sensores irá consolidar diversas ações de investigação permitindo que este veículo seja utilizado também numa vertente de recolha de dados científicos.

### **4.2. Especificações-alvo**

Por sua vez, as especificações-alvo são efetivamente os requisitos técnicos do veículo que irão fazer com que este cumpra as necessidades identificadas. Desta forma, seguindo

a metodologia descrita em 3.2.2, as especificações-alvo iniciais definidas são as seguintes:

- Peso máximo  $\approx 50\text{kg}$ ;
- Meio de tração dedicado para deslocação terrestre;
- Velocidade máxima em terra de  $20\text{ km/h}$ ;
- Meio de deslocação dedicado na água;
- Velocidade máxima em água de  $8\text{ nós}$ ;
- Flutuabilidade e estabilidade dentro de água;
- Autonomia superior a  $1\text{h}$ ;
- Fonte de energia independente;
- Casco fabricado em material resistente;
- Custo de fabrico inferior a  $5\text{ k€}$ .

Todavia, é de notar que com o decorrer da conceptualização e concretização do veículo, que é um processo iterativo, são encontrados alguns constrangimentos que resultam necessariamente na alteração das especificações alvo inicialmente estabelecidas.

### 4.3. Estudo de Mercado

Para o estudo do mercado, e seguindo a metodologia mencionada em 3.2.3, são compilados dados em relação a alguns dos veículos disponíveis no mercado com características próximas/semelhantes ao veículo visado nesta dissertação. Assim, de seguida são apresentados aqueles considerados como mais relevantes.

- **Argonaut**

- Fabricante: *Ultrabeam Hydrographic*
- Meio de atuação: Anfíbio
- Autonomia: 12h
- Dimensões: 3×1.45×1.8 m (Comprimento\*Largura\*Altura)
- Peso: NA
- Tração terrestre: Rodas 8×8, ou lagartas (acopláveis)
- Deslocação na água: 2 hélices com 2 motores
- Velocidade máxima em terra: 25.7 km/h
- Velocidade máxima em água: 7.24 km/h (3.9 nós)



Figura 29 - Argonaut. [8]

- **Warthog**

- Fabricante: *Clear Path Robotics*
- Meio de atuação: Anfíbio
- Autonomia: 3h
- Dimensões: 1.52×1.38×0.83 m (Comprimento×Largura×Altura)
- Peso: 280 kg
- Tração terrestre: Rodas, 4×4
- Deslocação na água: Rodas
- Velocidade máxima em terra: 18 km/h
- Velocidade máxima em água: NA



Figura 30 - Warthog. [29]

- **Moose**

- Fabricante: *Clear Path Robotics*
- Meio de atuação: Anfíbio
- Autonomia: 6h
- Dimensões: 2.96×1.55×1.14 m (Comprimento×Largura×Altura)
- Peso: 1590 kg
- Tração terrestre: Rodas, 8×8
- Deslocação na água: Rodas
- Velocidade máxima em terra: 30 km/h
- Velocidade máxima em água: NA



Figura 31 - *Moose*. [30]

- **Agema 6x6**

- Fabricante: *Milanion*
- Meio de atuação: Anfíbio
- Autonomia: 6h
- Dimensões: 2.44×1.47×1.29 m (Comprimento×Largura×Altura)
- Peso: 442 kg
- Tração terrestre: Rodas, 6×6
- Deslocação na água: Rodas
- Velocidade máxima em terra: 35 km/h
- Velocidade máxima em água: 5 km/h (2.7 nós)



Figura 32 - *Agema 6x6*. [31]

- **Agema 8x8**

- Fabricante: *Milanion*
- Meio de atuação: Anfíbio
- Autonomia: 6h
- Dimensões: 3.02×1.47×2.99 m (Comprimento×Largura×Altura)
- Peso: 602 kg
- Tração terrestre: Rodas, 8×8
- Deslocação na água: Rodas
- Velocidade máxima em terra: 29 km/h
- Velocidade máxima em água: 5 km/h (2.7 nós)



Figura 33 - *Agema 8x8*. [31]

Com base na informação recolhida no decorrer do estudo de mercado realizado, na Tabela 4, apresenta-se uma compilação das principais características e especificações consideradas relevantes para estabelecer um primeiro modelo concetual do veículo anfíbio aqui a desenvolver.

Tabela 4 - Estudo de mercado.

Veículo	Fabricante	Meio de atuação	Dimensões (C*L*A)	Peso (kg)	Deslocação em terrestre
Argonaut	Ultrabeam Hydrographic	Anfíbio	3,00*1,45*1,80	-	8x8 ou lagartas
Warthog	Clear Path Robotics	Terrestre (capacidade anfíbia fraca)	1,52*1,38*0,83	280	4x4
Moose	Clear Path Robotics	Anfíbio	2,96*1,55*1,14	1590	8x8
Husky	Clear Path Robotics	Terrestre	0,99*0,67*0,39	50	4x4
Agema 6x6	Milanion	Anfíbio	2,44*1,47*1,29	442	6x6
Agema 8x8	Milanion	Anfíbio	3,02*1,47*2,99	602	8x8
SL20Y	OceanAlpha	Superfície	1,05*0,55*0,35	14 (sem sensores)	-
SL40Y	OceanAlpha	Superfície	1,60*0,70*0,40	32	-
	Veloc. Máx. em terra (km/h)	Deslocação na água	Veloc. Máx. na água (km/h)	Autonomia	Possíveis missões
Argonaut	25,7	2 motores elétricos + 2 hélices	7,24 (3,9 nós)	12h	Recon e levantamento hidrográfico
Warthog	18	Rodas	-	3h	Recon, IED
Moose	30	Rodas	-	6h	Recon, levantamento hidrográfico e transporte
Husky	3,6	-	-	3h	Recon, IED
Agema 6x6	35	Rodas	5 (2,7 nós)	-	Recon, emprego de armamento, IED
Agema 8x8	29	Rodas	5 (2,7 nós)	-	Recon, emprego de armamento, IED
SL20Y	-	2 motores <i>waterjet</i>	18,52 (10 nós)	2h	Recon e levantamento hidrográfico
SL40Y	-	1 motor <i>waterjet</i>	22,22 (12 nós)	6h	Recon e levantamento hidrográfico

Na tabela anterior é possível observar que existem diversos tipos de veículos com características que preenchem as necessidades impostas. No entanto, alguns destes VNTs não apresentam configuração anfíbia, reduzindo a sua versatilidade, tal como é o caso do SL20Y e do SL40Y. Por outro lado, outros veículos apresentam dimensões demasiado grandes, o que dificulta a sua aplicação em alguns tipos de operações.

No entanto, fazendo um apanhado das informações resumidas na tabela anterior, algumas das características como as autonomias, velocidades e dimensões são importantes referências para a conceptualização do veículo deste trabalho.

#### **4.4. Conceptualização e desenvolvimento do veículo**

O desenvolvimento do casco começou com esboços manuais tendo como referências os desenhos técnicos e a aparência dos veículos previamente mencionados no estudo do mercado.

A principal necessidade a ter em atenção nesta fase é a que está diretamente relacionada com a facilidade de transporte e operação do veículo. Por esta razão as suas dimensões, e também o seu peso máximo, devem agilizar a sua operação. Por sua vez, peso máximo considerado é o que consta nas especificações, no entanto, apesar de nesta fase conceptual do projeto não se especificar com grande exatidão, é necessário deixar parte dessa massa total como margem para a instalação de sensores, considerada como a *payload* do veículo.

Quanto às dimensões, uma das referências utilizadas foi o Veículo Não Tripulado de Superfície SL20 da empresa *OceanAlpha*. Como é possível ver nas seguintes imagens, no *site* desta empresa são disponibilizadas algumas imagens que, em conjunto com as especificações do veículo, dão uma razoável perceção do tamanho do mesmo.



Figura 34 - USV SL20, da *OceanAlpha*. [32]



Figura 35 - USV SL20, da *OceanAlpha*. [32]

Desta forma, recorrendo ao *software* de modelação *SolidWorks*, desenvolve-se a primeira iteração do casco com as seguintes dimensões: 1.05×0.60×0.35 m (Comprimento × Largura × Altura).

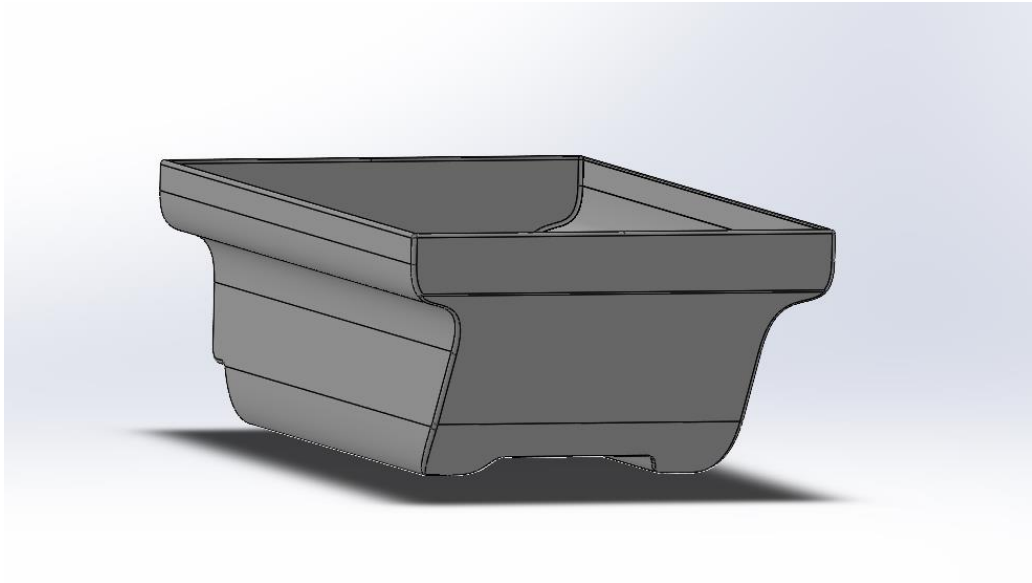


Figura 36 - Modelação do casco em *SolidWorks*.

Quanto ao formato e à aparência do veículo, o conceito baseia-se nos veículos Agema 6x6 e Argonaut das empresas *Milanion* e *Ultrabeam Hydrographic*, respetivamente (ver Figuras 33 e 36). As saliências nas laterais são desenhadas desta forma para permitir acoplar as rodas, ou lagartas, e, tal como nos outros veículos analisados, a saliência na parte inferior do veículo ajuda a ultrapassar obstáculos uma vez que aumenta a distância efetiva ao solo.

#### **4.5. Locomoção Terrestre**

Para a deslocação em terra, tal como explicado no subcapítulo 3.2.4.1, consideram-se, duas opções, nomeadamente, rodas ou lagartas.

Através da informação recolhida, determinam-se as vantagens e desvantagens, apresentadas na Tabela 5, para cada hipótese considerada.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens entre a utilização de rodas e lagartas.

Meio de tração	Vantagens	Desvantagens
<b>Lagartas</b>	Maior tração	Peso acrescido
	Maior resistência	Difícil manutenção
	Facilidade em passar obstáculos	Necessário construir à medida Em caso de falha, veículo fica inoperacional
<b>Rodas</b>	Permite velocidades mais elevadas	Menor durabilidade
	Adiciona fluibilidade ao veículo	Menor aderência em terrenos exigentes
	Facilidade de adquirir no mercado	
	Fácil manutenção	
	Maior redundância	

Assim, tal como é possível observar na tabela anterior, para este veículo, a utilização de rodas aparenta ser a opção mais vantajosa, nomeadamente pela facilidade na sua aquisição e menor custo, do que a opção das lagartas.

Por sua vez, seguindo o método descrito em 3.2.4.1, é construída a seguinte tabela com o objetivo de determinar a configuração que mais se adequa para a utilização de rodas no veículo aqui desenvolvido.

Tabela 6 - Análise da configuração para a tração terrestre.

Coefficiente	Característica	Um motor por roda	Um motor com diferencial	Roda com motor
4	Custo	2	1	3
3	Aplicabilidade	3	2	4
2	Redundância	4	1	5
1	Disponibilidade no mercado	5	3	4
10		30	15	38
		3	1,5	3,8

A atribuição dos valores de adequabilidade de cada configuração para cada característica apresentados na tabela anterior, é realizada com base numa avaliação

qualitativa recorrendo ao conhecimento empírico e experiência das informações existentes sobre cada uma das possibilidades.

Por conseguinte, a solução pela qual se opta é a de instalar no veículo rodas com um motor elétrico no interior das mesmas, como por exemplo a que está representada na Figura 41. Esta solução aparenta demonstrar ser a mais adequada pois já é um produto disponível no mercado (utilizado noutros tipos de veículos não tripulados, carros e até bicicletas), reduz o espaço ocupado no interior do casco do veículo e proporciona uma maior redundância e melhor tração pois dá ao veículo tração independente a todas as seis rodas.



Figura 37 - Exemplo de roda com motor elétrico.

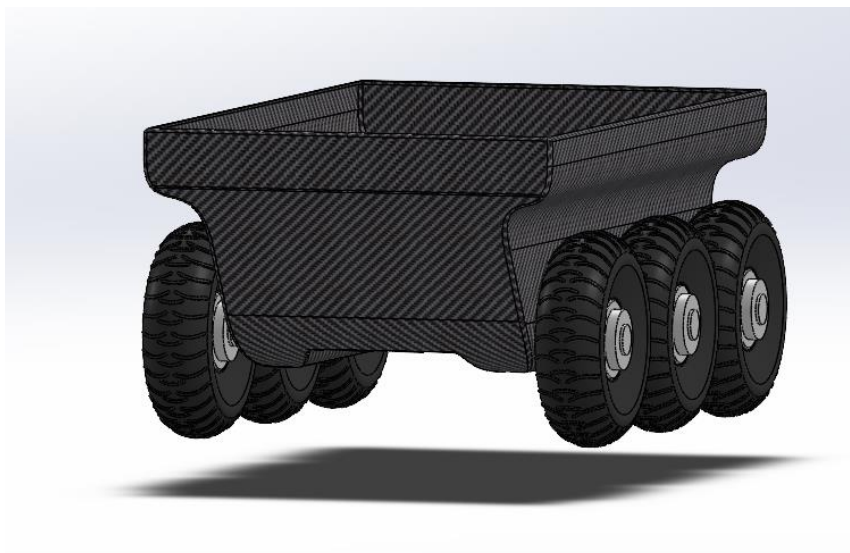


Figura 38 - Veículo terrestre não tripulado, em *SolidWorks*.

#### 4.6. Dimensionamento dos motores terrestres e baterias

De acordo com a metodologia descrita em 3.2.4.2, é possível obter a potência necessária para cada motor de forma a cumprir com os parâmetros estabelecidos.

Determina-se por sua vez que a potência total máxima requerida durante o cumprimento do perfil de missão determinado para o dimensionamento dos motores é de aproximadamente 2400 W, o que resulta numa potência de 400 W por motor.

Por sua vez, tal como se observa no Apêndice C, é também prevista uma autonomia para o veículo no decorrer desta missão.

Para tal, através de uma breve pesquisa, determina-se que uma possível configuração de baterias poderá ser a instalação de quatro baterias de 20 Ah cujo peso é de 5 kg cada uma, com dimensões 24.5×16×7 cm.

Para além das dimensões, peso e características do exemplo de bateria ilustrado na Figura 43, é importante referir que se opta por uma bateria de iões de lítio pela sua fácil e comum aplicação neste tipo de veículos elétricos, pela sua disponibilidade no mercado e também por ter uma maior energia específica e densidade energética do que a outra opção mais comum, baterias de ácido-chumbo (ver subcapítulo 2.4.1.).



Figura 39 - Exemplo de bateria de iões de Lítio.

Desta forma considera-se inicialmente uma capacidade total de 80 Ah, o que segundo os cálculos apresentados equivale a aproximadamente 1 hora de 7 minutos de operação. Com esta autonomia estabelecida, este primeiro perfil de missão, ver Figura 44, prevê então um percurso com as seguintes distâncias:

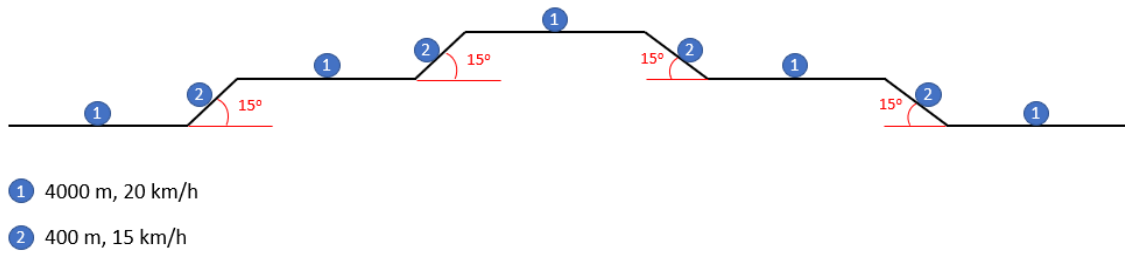


Figura 40 - Perfil de Missão 1 (terrestre) com distâncias e velocidades praticadas.

Através do seguinte gráfico é possível observar a percentagem da autonomia total que é consumida em cada segmento.

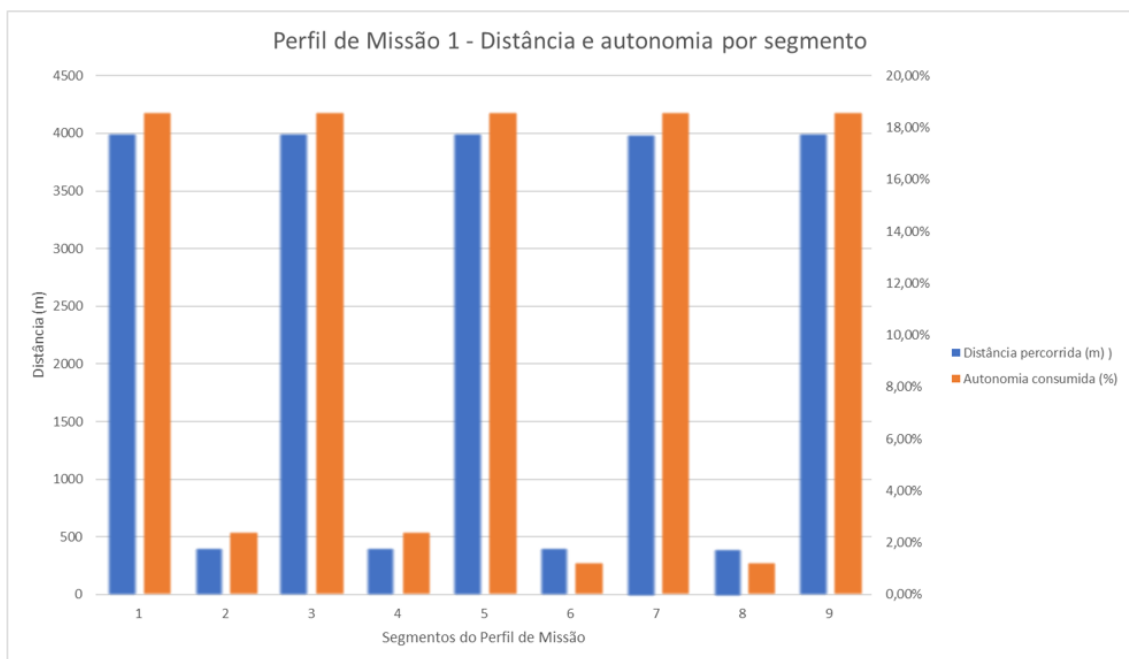


Figura 41 - Gráfico Distância vs. Autonomia para o Perfil de Missão 1.

Apesar de as subidas terem um declive considerável (15°) e de a potência requerida para as transpor ser quase a mesma do que a necessária para percorrer os segmentos planos, observa-se que nos segmentos planos utiliza-se quase 9 vezes mais bateria do que nas subidas pois requerem mais tempo para transpor. Por fim, verifica-se que a autonomia estabelecida é cumprida.

#### 4.7. Estabilidade Intacta

Uma vez completa a modelação do casco e rodas do veículo, procede-se ao estudo da estabilidade do veículo com base na metodologia descrita em 3.2.7.

Desta forma, através dos dados retirados do *software Maxsurf* (ver Figura 426), é possível observar dados importantes como a altura da linha de água, altura metacêntrica, entre outros.

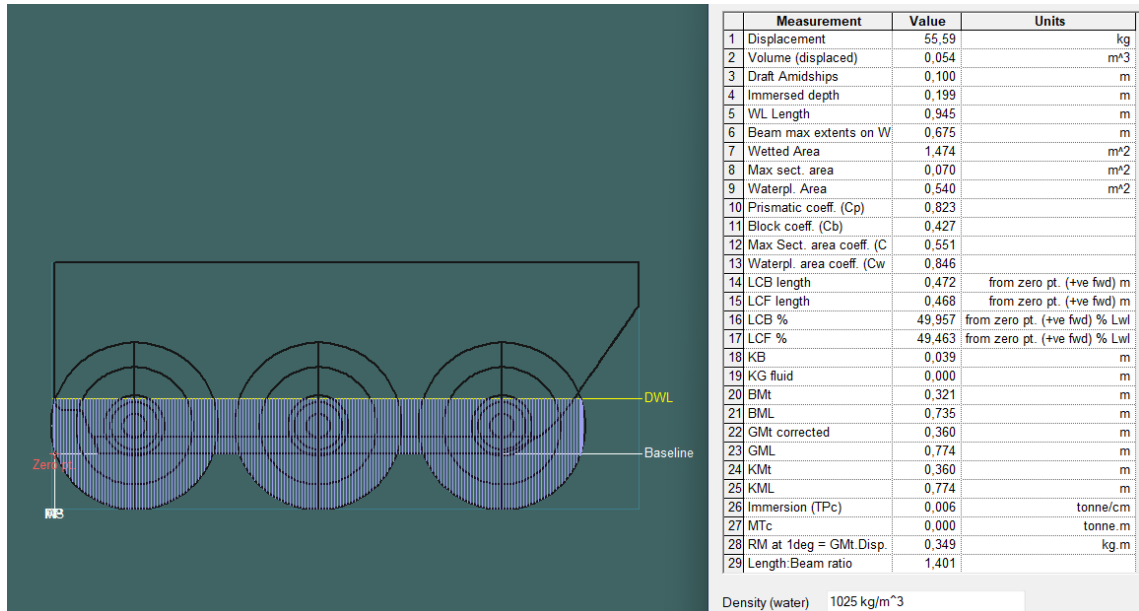


Figura 42 - Análise em *Maxsurf*, relatório hidrostático.

Verifica-se então que a estabilidade intacta do veículo projetado é positiva, sendo a altura metacêntrica de 0.360 m.

#### 4.8. Dimensionamento dos motores para água

O principal resultado a obter do estudo da deslocação do veículo no meio aquático é a resistência do mesmo quando se desloca à velocidade máxima especificada de 8 nós.

Desta forma, seguindo a metodologia referida em 3.2.4.3, foi possível obter o resultado da resistência recorrendo tanto ao *software Fluent* como ao *Maxsurf*. No entanto, devido ao *software* não conseguir processar o modelo do veículo com rodas, a simulação realizada no *Maxsurf* foi realizada com o modelo do casco sem rodas.

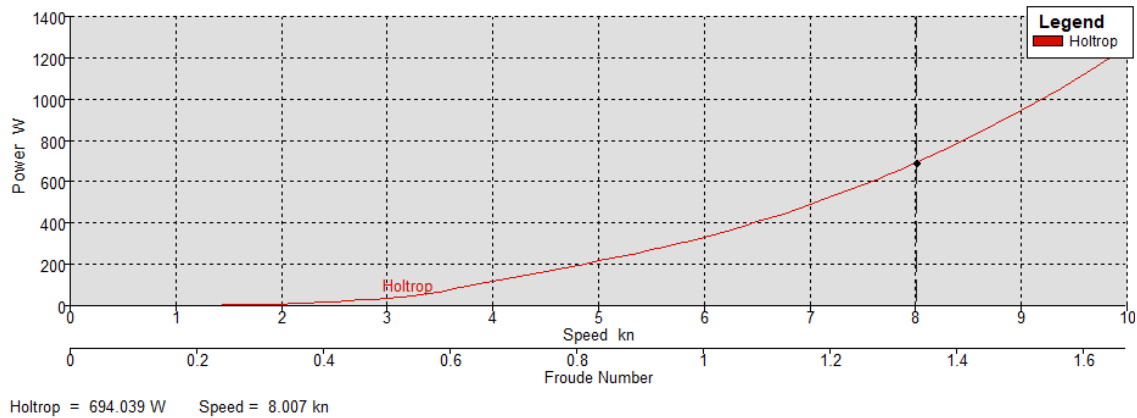


Figura 43 - Gráfico Velocidade vs. Potência, *Maxsurf*.

O resultado obtido através do *Maxsurf*, ver Figura 47, é de 694 W de potência a 8 nós (4.116 m/s) de velocidade.

Considerando o modelo completo do veículo, a força de *drag* obtida no *Fluent* é de sensivelmente 317.5 N, ver Figura 48, o que, considerando o funcionamento do veículo à sua velocidade máxima de 8 nós, equivale a uma potência de 1306.8 W.

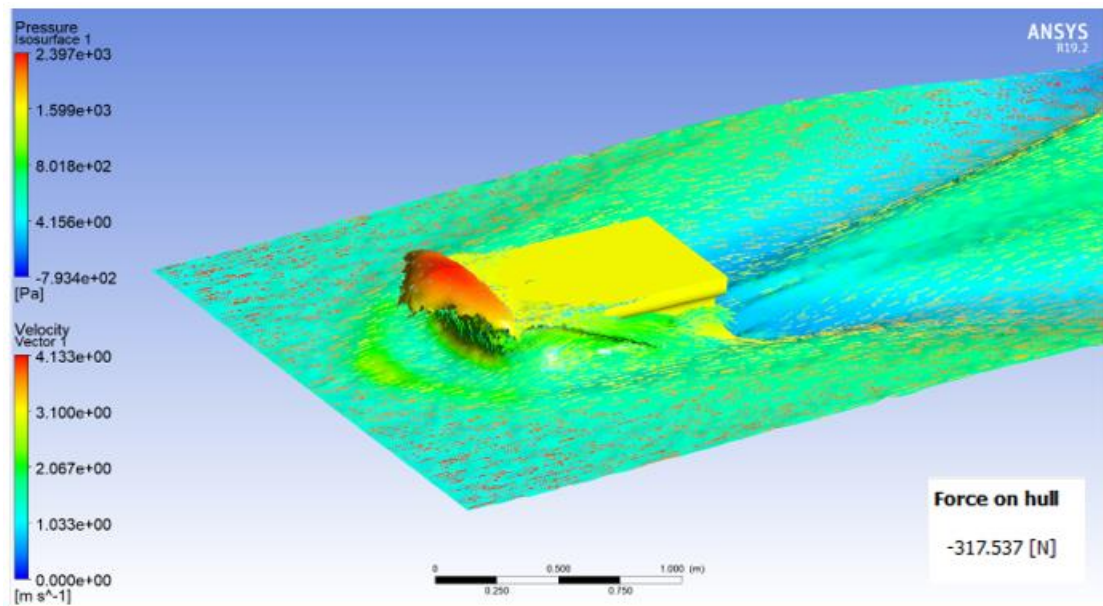


Figura 44 - Análise CFD, *Ansys Fluent*.

Contudo, através da comparação dos valores obtidos é possível “pré-validar” numericamente os resultados uma vez que, apesar de diferentes, os valores apresentados fazem sentido e, tal como seria de esperar, o valor obtido pela simulação do casco sem rodas é inferior.

Com base na potência requerida de 1306.8 W, e após uma breve análise do mercado, considera-se a utilização de um motor. O motor a escolher poderá também ser facilmente adquirido no mercado, como por exemplo o que é apresentado na Figura 49.



Figura 45 - Exemplo de motor aquático.

Considerando então uma potência de aproximadamente 1310 W, através dos cálculos realizados na folha de cálculo apresentada no Apêndice C, observa-se que a autonomia mínima é garantida também no cumprimento do Perfil de Missão 2, ver Figura 50.

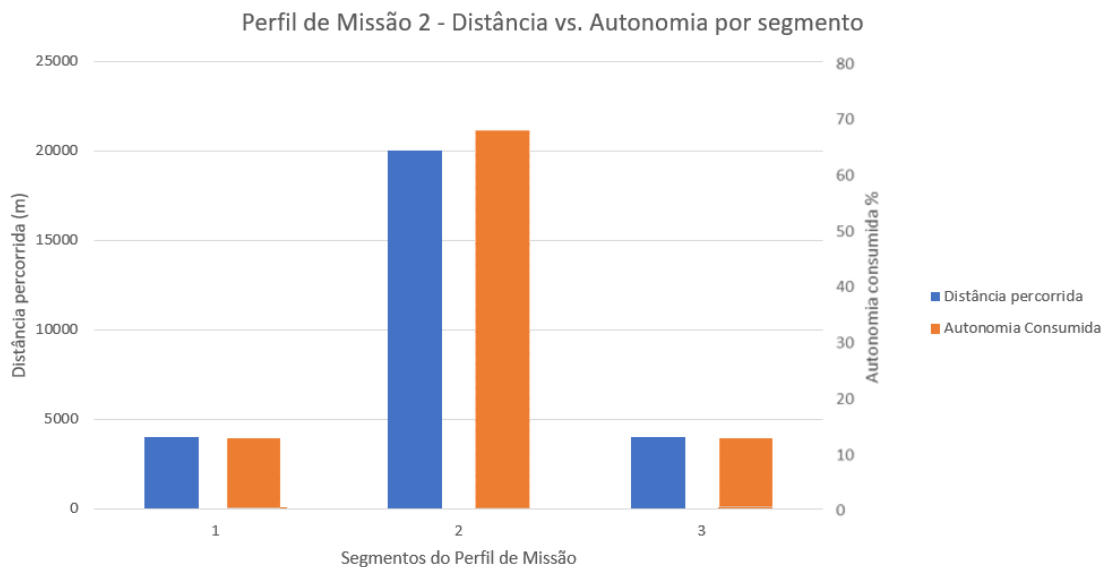


Figura 46 - Gráfico Distância vs. Autonomia para o Perfil de Missão 2.

É possível observar que neste perfil, onde o tempo total para este percurso é de 1h e 45 minutos, é quase alcançada a autonomia total de baterias e que o veículo é capaz de praticar grandes distâncias no meio aquático cumprindo a autonomia requerida.

## 4.9. Análises Estruturais Estática e Dinâmica

Para aferir a integridade estrutural do veículo, são realizadas análises estruturais estáticas e dinâmicas ao veículo projetado, seguindo a metodologia descrita no subcapítulo 3.2.4.5 para os seguintes casos:

- a) Casco sujeito a uma carga estática;
- b) Veículo sujeito a cargas estáticas nas rodas;
- c) Veículo sujeito a cargas dinâmicas (degrau, meio seno e seno).

### • Caso a)

Considerando uma carga total aplicada de 350N, que simula o peso das baterias e da *payload*, e as condições de fronteiras ilustrada na Figura 28 obtém-se a Figura 51 que ilustra a distribuição de tensões de *Von-Mises* no casco.

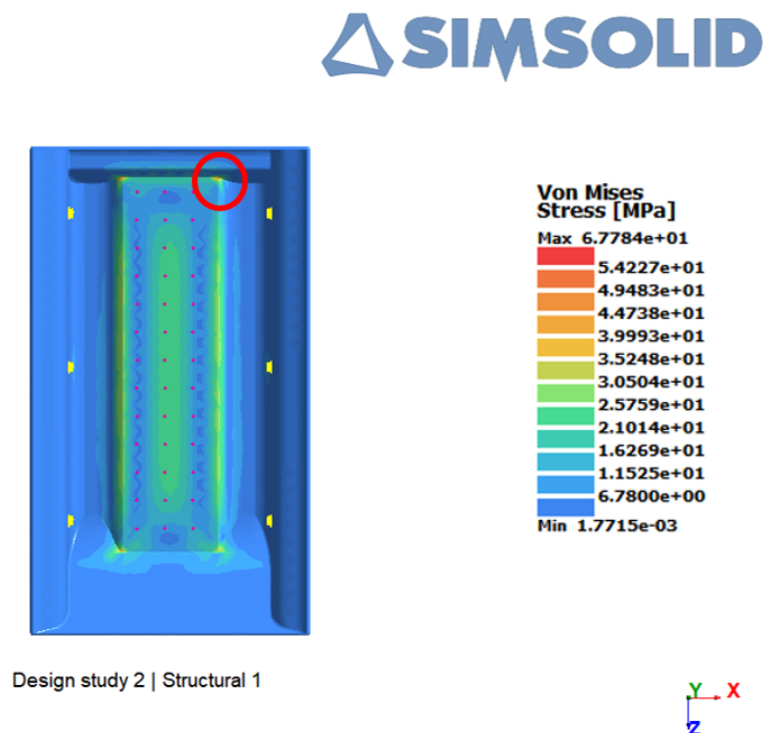


Figura 47 - Distribuição de tensões no casco para o caso a).

Desta figura verifica-se que a tensão máxima a que a estrutura é sujeita é de aproximadamente 68 MPa localizada na região identificado pela circunferência a vermelho. Atendendo a que a tensão de cedência do material do casco, Fibra de carbono Zoltek™ PX35 P/TW28-50, é de 4137 MPa, comprova-se que o material e geometria do casco é capaz de suportar com “grande” eficácia a carga que lhe é imposta.

• **Caso b)**

Considerando uma carga total aplicada de 550 N, o equivalente à massa total do veículo, e as condições de fronteira ilustradas na Figura 29 obtêm-se os deslocamentos, ver Figura 52, e a distribuição de tensões de *Von-Mises*, ver Figura 53, no veículo.

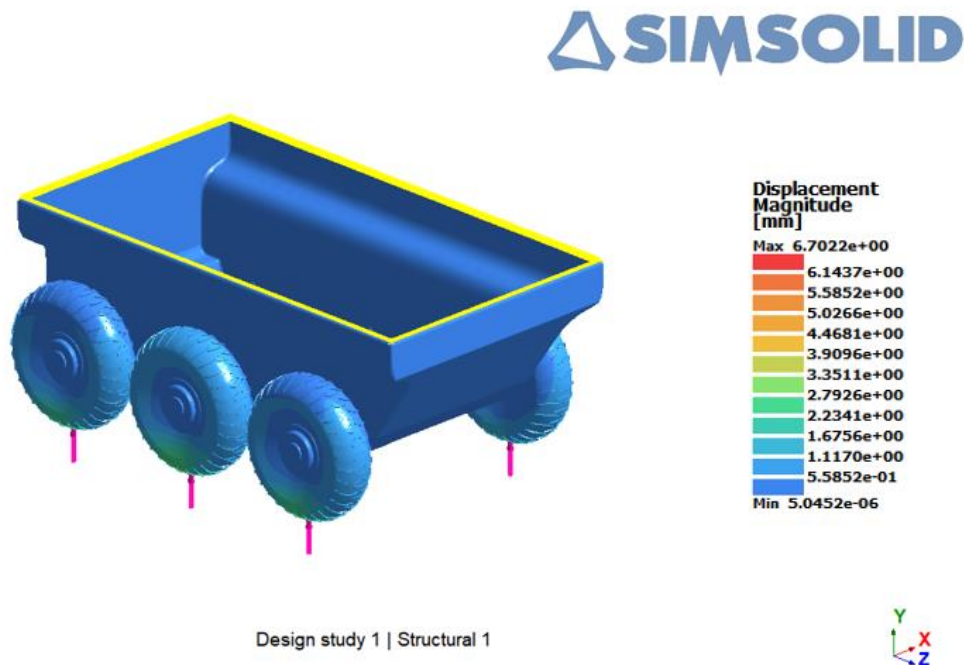


Figura 48 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso b).

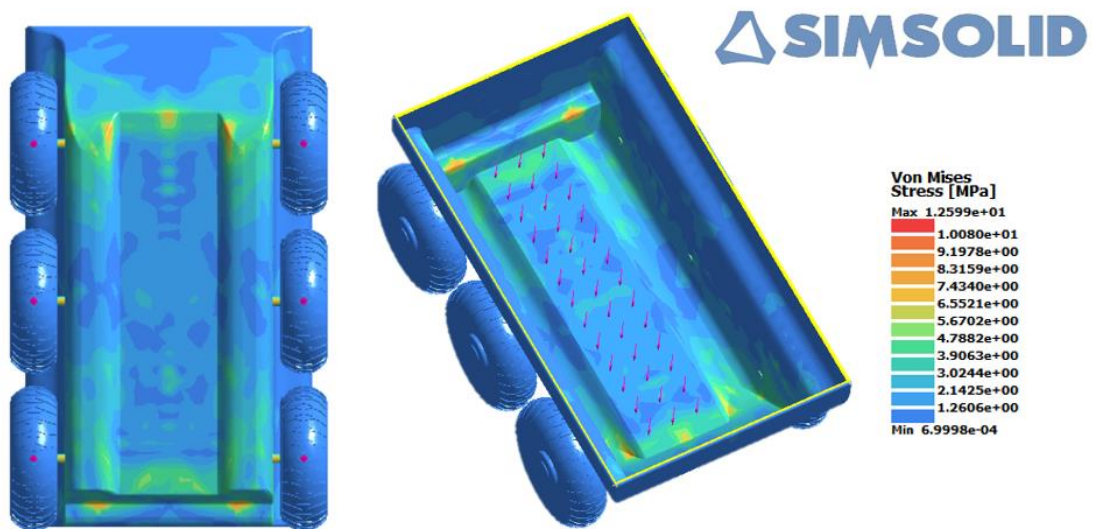


Figura 49 - Distribuição de tensões no veículo para o caso b).

Da Figura 52, verifica-se que o deslocamento máximo ocorre nos pneus, como seria de esperar (material menos rígido e em contacto direto com as cargas aplicadas), com um valor de aproximadamente 6.7 mm.

Da Figura 53, é possível observar que os pontos onde se detetam as tensões mais elevadas são algumas arestas e vértices da estrutura do casco e os veios que conectam as rodas ao mesmo. Assim, verifica-se que a tensão máxima a que a estrutura é sujeita é de aproximadamente 12.6 MPa localizada no veio. Atendendo a que a tensão de cedência do material do veio, liga de alumínio 7075, é de 503 MPa, comprova-se que o material é capaz de suportar com “grande” eficácia a carga que lhe é imposta.

Para a deteção do primeiro ponto de falha, ao aumentar-se gradualmente a carga aplicada, determina-se que o veio de ligação às rodas (assumindo a sua construção em alumínio 7075) é o primeiro componente a falhar, ver Figura 54, pois tem a tensão de cedência de aproximadamente uma ordem de grandeza menor, mas, no entanto, esta falha verifica-se apenas quando a carga aplicada alcança aproximadamente os 34.5 kN.

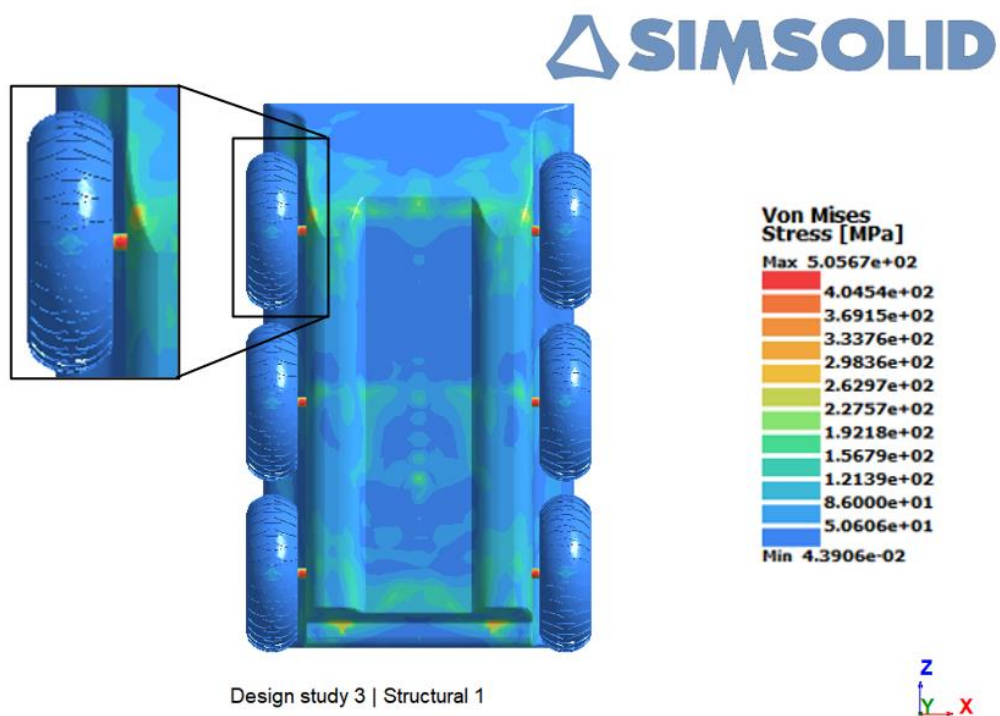


Figura 50 - Distribuição de tensões no veículo para a carga crítica de 34.5 kN.

• **Caso c)**

Na análise estrutural dinâmica, tal como descrito na metodologia, as cargas são aplicadas ao veículo, ver Figura 29, considerando independentemente uma das três funções (degrau, meio seno e seno) previamente definidas, ver Figuras 30-32.

As Figuras 55-60, ilustram o campo de deslocamentos e de tensões de *Von-Mises*, respetivamente, no veículo obtidos considerando uma carga aplicada, com uma amplitude constante de 550 N, o equivalente à massa total do veículo, e as condições de fronteira ilustradas na Figura 29.

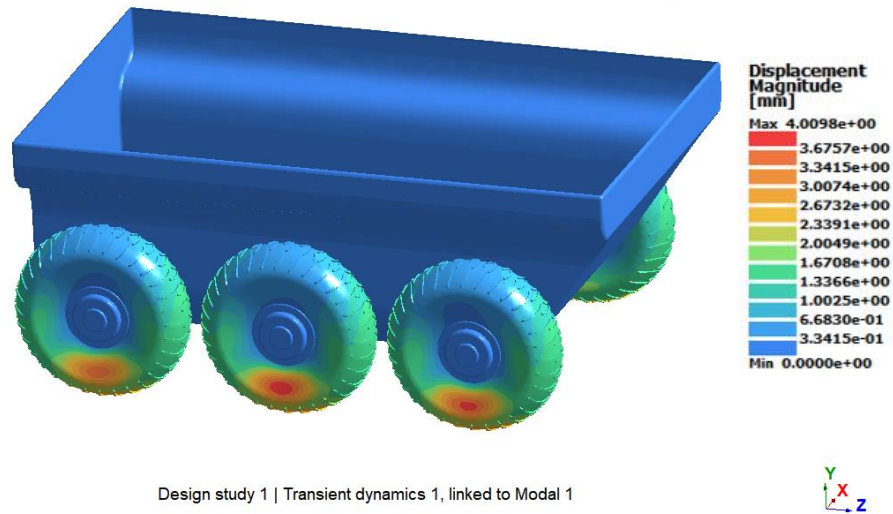


Figura 51 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função degrau.

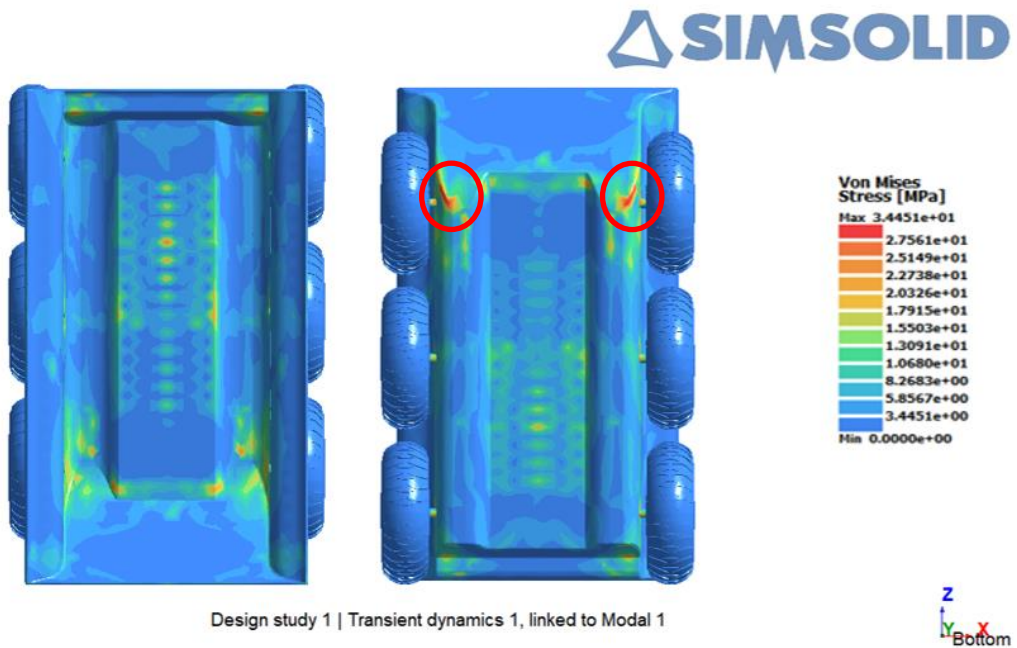


Figura 52 - Tensões obtidas na análise estrutural dinâmica ao veículo, função degrau.

Das Figuras 55 e 56, verifica-se que para uma excitação do tipo degrau se obtém um deslocamento máximo nos pneus de aproximadamente 4 mm e uma tensão máxima de aproximadamente 34.5 MPa localizada nas regiões identificadas pelas circunferências a vermelho.

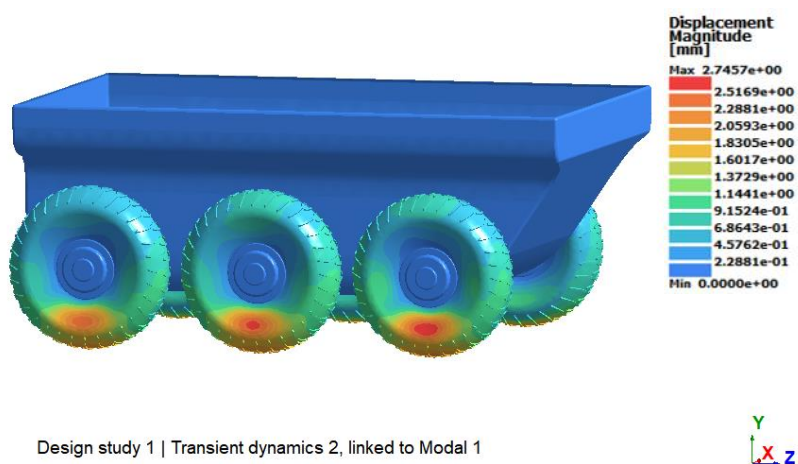


Figura 53 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função meio seno.

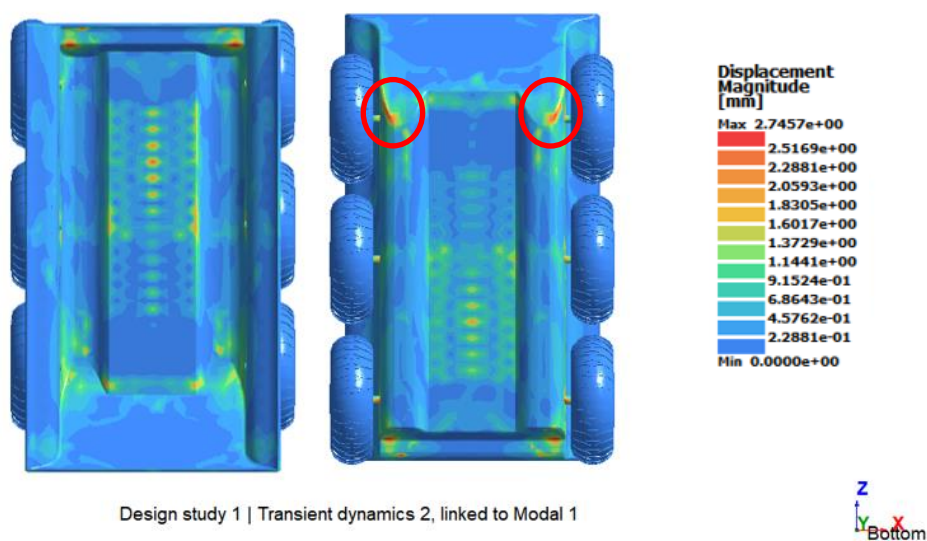


Figura 54 - Distribuição de tensões no veículo para o caso c), função meio seno.

Das Figuras 57 e 58, verifica-se que para uma excitação do tipo meio seno se obtém um deslocamento máximo nos pneus de aproximadamente 2.7 mm e uma tensão máxima de aproximadamente 14.5 MPa localizada nas regiões identificadas pelas circunferências a vermelho.

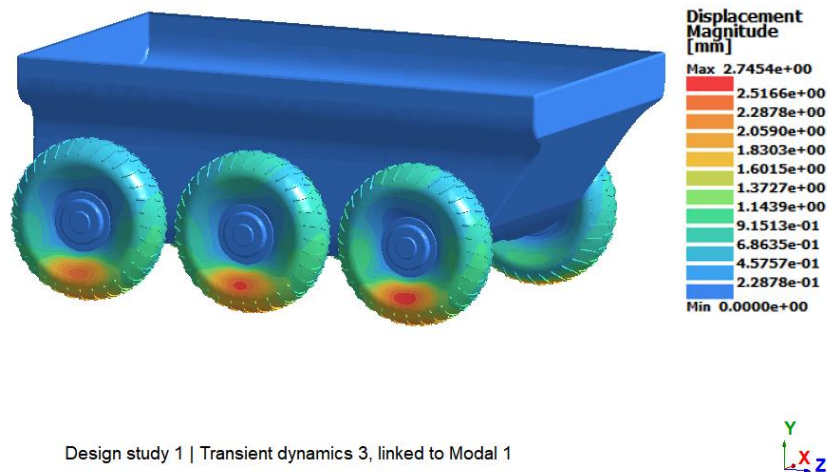


Figura 55 - Campo de deslocamentos no veículo para o caso c), função seno.

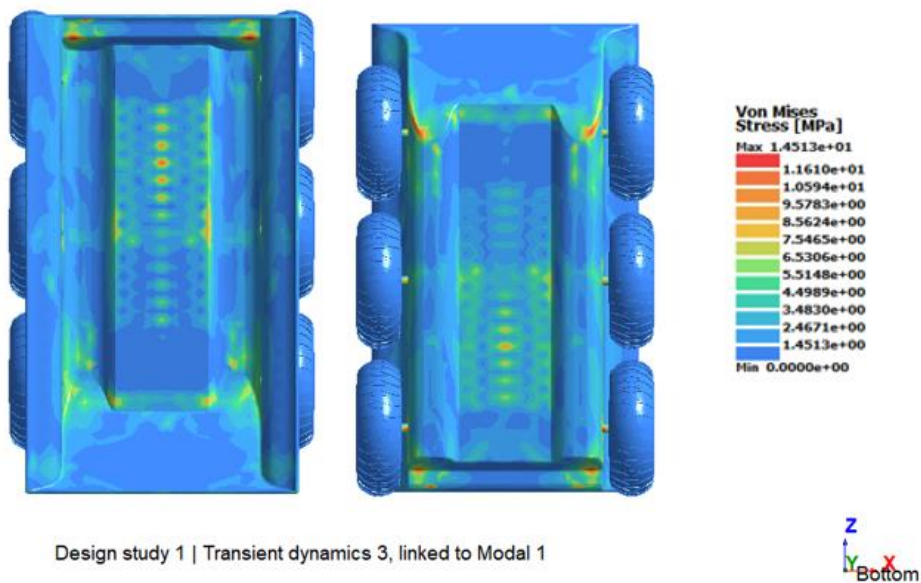


Figura 56 - Distribuição de tensões no veículo para o caso c), função seno.

Das Figuras 59 e 60, verifica-se que para uma excitação do tipo seno se obtém um deslocamento máximo nos pneus de aproximadamente 2.7 mm e uma tensão máxima de aproximadamente 14.5 MPa localizada nas regiões identificadas pelas circunferências a vermelho.

Concluindo, verifica-se que o veículo está sujeito a maiores tensões quando é aplicada uma carga segundo uma função degrau uma vez que desta forma a força é aplicada de forma descontínua (mais brusca), de forma a simular um impacto. Quanto às outras duas análises, os valores obtidos apresentam ser sensivelmente metade dos anteriores e ambas apresentam valores semelhantes, como seria de esperar. Note-se que em nenhum dos casos é atingida a tensão de cedência dos materiais que compõem o veículo.

#### 4.10. Estimativa de Custo

Tendo em conta as especificações finais, na Tabela 7 apresenta-se uma estimativa inicial de custo de produção do veículo considerando as dimensões e componentes atuais assim como os materiais considerados na análise estrutural.

Tabela 7 - Estimativa de custo do veículo.

<b>Componente/Trabalho</b>	<b>Estimativa de Custo</b>
Baterias	1 200 €
Motores terrestres	720 €
Motor aquático	135 €
Comando de controlo	300 €
Telemetria	80 €
Cabos	100 €
Fibra de carbono	1000 €
Material para molde	300 €
Mão de obra (80h;15€/h)	1200 €
<b>Total</b>	<b>3755 €</b>

Neste sentido, destaca-se que o maior custo está relacionado com as baterias e a mão de obra. Ainda assim, esta estimativa inicial encontra-se abaixo do limite máximo de 5 000 € definido, inicialmente, como desejado para o veículo.

#### 4.11. Especificações e Configuração Final

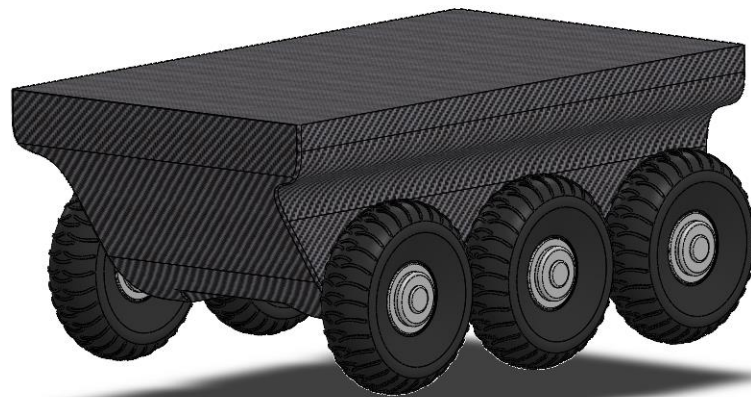
Assim como foi referido na metodologia, o último passo do desenvolvimento conceptual é a reconsideração das especificações estabelecidas inicialmente após a criação desta primeira iteração do projeto.

Das especificações/requisitos inicialmente impostos a única alteração foi no aumento do peso do veículo para 55 kg. As razões que justificam esta alteração são o facto de possibilitar uma maior *payload*, mantendo o número de baterias necessárias. Esta alteração não teve nenhuma implicação negativa quanto ao cumprimento das restantes necessidades determinadas, sendo possível manter a velocidade máxima, condições de estabilidade e nível da linha de água aceitável.

Desta forma, as especificações finais do veículo são:

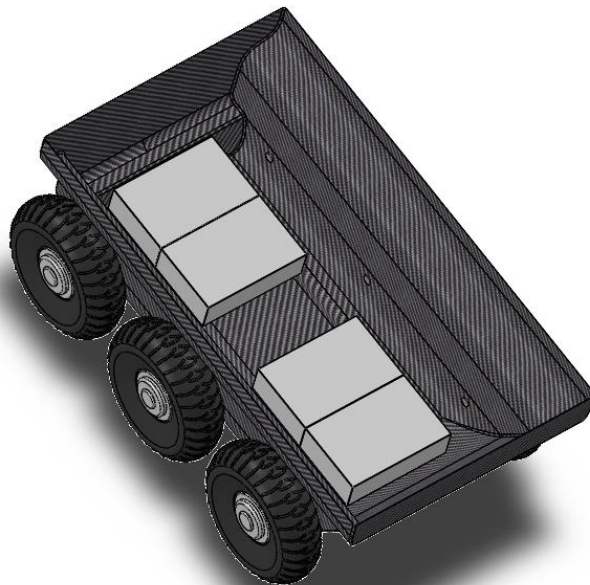
- Peso máximo 55kg;
- Tração terrestre 6×6;
- Velocidade máxima em terra de 20 km/h;
- Meio de deslocação dedicado na água;
- Velocidade máxima em água de 8 nós;
- Flutuabilidade e estabilidade dentro de água;
- Autonomia de sensivelmente 1 h e 30 min.;
- 4 baterias de Li-ion (80 Ah);
- Casco fabricado em material resistente.

As Figuras 61 e 62 ilustram duas perspetivas do modelo CAD em *SolidWorks* do Veículo Anfíbio Não Tripulado desenvolvido nesta dissertação e a Figura 63 ilustra as respetivas projeções ortogonais.



---

Figura 57 - Modelo CAD completo do Veículo.



---

Figura 58 - Interior do modelo CAD do Veículo com as baterias visíveis.

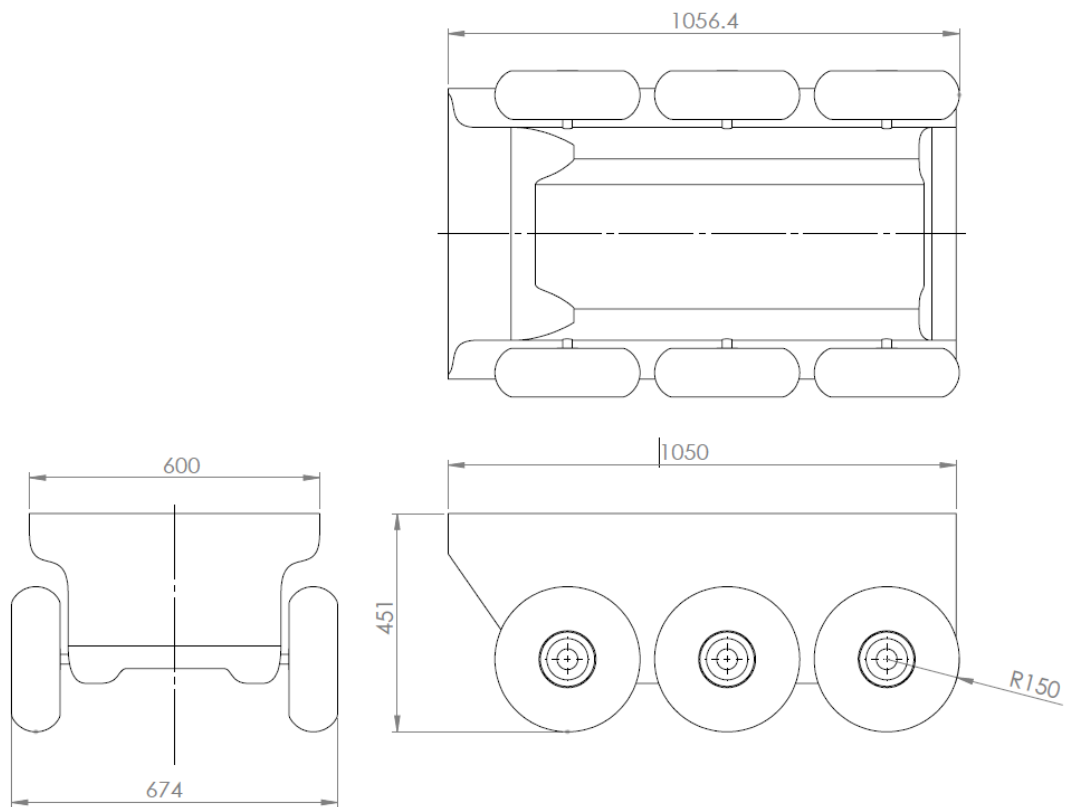


Figura 59 - Projeções ortogonais do modelo do Veículo.

A Figura 64 ilustra o conceito do que poderá vir a ser o futuro deste trabalho.



Figura 60 - Conceito futuro para o projeto do Veículo Anfíbio Não Tripulado.

As Figuras 65 e 66, ilustram o conceito do veículo aqui desenvolvido em cenários de operação terrestre e marítimo, respetivamente.



Figura 61 - Exemplo de conceito final do Veículo Anfíbio Não Tripulado em terra.



Figura 62 - Exemplo de conceito final do veículo numa operação de desembarque anfíbio.

Assim, e em forma de pré-conclusão, observa-se que uma vez estabelecidas as especificações finais para esta fase concetual de desenvolvimento do veículo, é possível

afirmar que o veículo projetado, visa ser uma alternativa competente aos outros veículos existentes mencionados nesta dissertação.

Verifica-se que, relativamente a outros veículos no mercado, este veículo possui a capacidade de alcançar velocidades semelhantes em terra e superiores dentro de água, é mais leve e de menor dimensão, mantendo a capacidade de atuar eficientemente em ambos os meios. Em termos relativos, o veículo desenvolvido neste trabalho peca pela sua autonomia ser inferior.

No entanto, acredita-se que a autonomia do veículo poderá ser melhorada sem alteração das restantes características do mesmo, uma vez que se perspetiva um avanço considerável na indústria das baterias em que, no espaço de alguns anos, a energia específica das mesmas aumente consideravelmente [15].



## 5. Conclusão

Considera-se que o principal objetivo de criar um veículo anfíbio não tripulado para a Marinha Portuguesa foi concluído com sucesso. Até à data, foi possível concretizar o projeto conceptual de um veículo que, pela sua elevada versatilidade, poderá vir a ser um meio rentável para a Marinha, uma vez que permite ser aplicado em diversos cenários operacionais com custos inferiores aos de qualquer outro veículo atualmente disponível no mercado.

Cumpriram-se os objetivos que permitem satisfazer as necessidades estipulados de forma a concretizar e validar o projeto. Foram garantidos os principais requisitos operacionais dos veículos e por isso conclui-se que este conceito poderá ser um projeto com mais continuidade.

Contudo, uma vez que este trabalho apresenta apenas o projeto conceptual, a concretização do projeto até à fase de construção poderá apresentar algumas alterações que darão origem a novas iterações deste conceito e que, conseqüentemente, darão origem a novos resultados.

Acredita-se que o conhecimento adquirido e o trabalho desenvolvido até ao momento, irá permitir a realização de trabalhos futuros no seguimento deste projeto, utilizando as ferramentas base já criadas, como, por exemplo, o desenvolvimento do projeto mais detalhado e, por conseguinte, a construção de um modelo para a realização de testes, avaliação e otimização do veículo anfíbio. Para além de uma otimização dos aspetos já trabalhados neste projeto, espera-se que, no futuro, seja possível dar continuidade ao mesmo, podendo vir a ser realizadas dissertações onde se abordem temas tais como o controlo do veículo e a instalação de sensores e outros equipamentos, aumentando as suas capacidades e versatilidade.



## Bibliografia

- [1] Czaplá, T., & Wrona, J. (2013). Technology development of military applications of unmanned ground vehicles. *Studies in Computational Intelligence*, 481, 293–309. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00369-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00369-6_19)
- [2] Bluebird Marine Systems Ltd.: Nikola Tesla. Acedido em 14 de junho de 2022, em: [https://www.bluebird-electric.net/Bluebird\\_Boats\\_Ships\\_Systems/Nikola\\_Tesla.htm](https://www.bluebird-electric.net/Bluebird_Boats_Ships_Systems/Nikola_Tesla.htm)
- [3] Standing Well Back, IED & EOD Evolutions, 2020. Acedido em 14 de junho de 2022, em: <https://www.standingwellback.com/german-explosive-remote-control-speedboats-of-ww1-and-ww2/>
- [4] Leopardo B da EuroLink Systems. Acedido em 14 de junho de 2022, em: <https://eurolinksystems.com/>
- [5] Gage, D. W. (1995). Special Issue on Unmanned Ground Vehicles. *Unmanned Systems Magazine*. 13(3). <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422845.pdf>
- [6] Testing of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Systems (Vol. 298, Número 0704). (2008). <https://doi.org/10.1090/dimacs/029/20>
- [7] Wikipedia: Goliath tracked mine. Acedido em 24 de maio de 2022, em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Goliath\\_tracked\\_mine](https://en.wikipedia.org/wiki/Goliath_tracked_mine)
- [8] Unmanned Systems Technology: Amphibious Vehicle Autopilot Under Development for British Army. Acedido em 25 de maio de 2022, em: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2021/03/amphibious-vehicle-autopilot-under-development-for-british-army>
- [9] Marinha: Mergulhadores da Marinha treinam operações contra ameaças terroristas em Espanha. Acedido em 25 de maio de 2022, em: <https://www.marinha.pt/pt/media-center/Noticias/Paginas/Mergulhadores-da-Marinha-treinam-opera%C3%A7%C3%B5es-contra-amea%C3%A7as-terroristas-em-Espanha.aspx>
- [10] Marinha: Marinha com mais recursos para garantir a proteção do território português. Acedido em 25 de maio de 2022, em: <https://www.marinha.pt/pt/media->

<center/Noticias/Paginas/Marinha-com-mais-recursos-para-garantir-a-missao-de-prote%C3%A7ao-do-territorio-portugues.aspx>

- [11] Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Yang, M. C. (2020). *Product Design and Development*. 7th ed., McGraw-Hill Education.
- [12] *Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (5th Edition) - Knovel*. Obtido 14 de Março de 2016, de <https://tinyurl.com/33ypbk4w>
- [13] Lewis, E. V. (1988). PNA - Volume I - Stability and Strength. Em *Principles of Naval Architecture*.
- [14] Moore, C.S. (2010). *Intact Stability*, The Society of Naval Architects & Marine Engineers, Jersey City, NJ, USA.
- [15] Ribeiro, J. P. V. (2019). Life Cycle Assessment of Lithium-Based Batteries for Conceptual Hybrid-Electric Aircraft. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- [16] Jarema, R. (2018). 10 Steps to Choosing the Right Motors for your Robotic Project. Acedido em 8 de abril de 2022, em: <https://medium.com/husarion-blog/10-steps-to-choosing-the-right-motors-for-your-robotic-project-bf5c4b997407>
- [17] DeWolf, J. T., Mazurek, D. F., Beer, F. P., Johnston JR., E. R. B., (2021). *Mecânica dos Materiais*, 8 edição. McGraw Hill.
- [18] Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56(C), 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>
- [19] White, F. (2010). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill: New York.
- [20] Icepak, ANSYS. (2013). *ANSYS Icepak User's Guide*. ANSYS Inc.
- [21] Alexandre, D. (2021). Design and optimization of triple clamps for racing motorcycles. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- [22] J. N. Reddy. *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill Education, 2005. ISBN 9780072466850.

- [23] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th edition, 2001. ISBN 978-0-471-35605-9.
- [24] Product introduction simsolid. URL <https://tinyurl.com/2em2wpbb>. visited on 13-09-2021.
- [25] Altair hyperworks - altair simsolid - verification manual, 2019. URL <https://tinyurl.com/azz595ed>.
- [26] Wong, J. Y., & Huang, W. (2006). «Wheels vs. tracks» - A fundamental evaluation from the traction perspective. *Journal of Terramechanics*, 43(1), 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.08.003>
- [27] Lopes, V. A. P. (2018). *Projeto Conceptual de um Veículo Não Tripulado de Superfície para a Escola Naval – VENT-SUP-EN*. Dissertação de Mestrado, Escola Naval.
- [28] Holtrop, J., Mennen, G.G.J. (1982). An Approximate Power Prediction Method. *International shipbuilding progress*, 29, 166-170. DOI: 10.3233/ISP-1982-2933501.
- [29] Clearpath Robotics: Warthog Unmanned Ground Vehicle. Acedido em 12 de junho de 2022, em: <https://clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/>
- [30] Clearpath Robotics: Moose Unmanned Ground Vehicle. Acedido em 12 de junho de 2022, em: <https://clearpathrobotics.com/moose-ugv/>
- [31] Milanion: Agema UGV. Acedido em 12 de junho de 2022, em: <https://milaniongroup.com/agema-ugv/>
- [32] OceanAlpha: SL20Y USV. Acedido em 12 de junho de 2022, em: <https://oceanalpha.com/product-item/sl20y/>
- [33] Evans, J.H., 1959. Basic Design Concepts. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 71: 671-678. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1959.tb01836.x>
- [34] NATO, 2010. NATO AAP-20 - NATO Programme Management Framework.s.l.: North Atlantic Treaty Organization.
- [35] Américo, M. J. (2009). *Sistema de avaliação da estabilidade transversal de navios em tempo real*.

[36]Rego, Ricardo T. (2017). *Development of cooling systems for nuclear fusion components*

# Apêndices

## Apêndice A – Artigo submetido nas Jornadas do Mar 2022

### Projeto de um Veículo Anfíbio Não Tripulado Modular de Baixo Custo

António Anastácio

Escola Naval

[mata.anastacio@marinha.pt](mailto:mata.anastacio@marinha.pt)

#### Resumo:

Os veículos não tripulados têm vindo a ter uma importância cada vez mais relevante em vários cenários de operações civis e militares. Nesse contexto, o presente trabalho visa o projeto conceptual de um veículo anfíbio modular, no sentido que pode facilmente ser adaptado para diferentes tipos de missões, não tripulado de baixo custo monetário (< 5 k€, sem sensores). Tendo como principal foco a mais recente Diretiva Estratégica da Marinha Portuguesa, são observadas as necessidades e estabelecidas as especificações e requisitos necessários para as possíveis missões de interesse direcionadas a veículos anfíbios não tripulados. Prossegue-se com um estudo de mercado onde se averigua quais as soluções já existentes e as características e capacidades de alguns veículos de relevância atualmente disponíveis. Com base no conhecimento adquirido, inicia-se o projeto conceptual propriamente dito onde se identifica e analisa os principais parâmetros de forma a seleccionar os mais indicados para o veículo a desenvolver. Posto isto, realiza-se o dimensionamento do veículo onde são realizados estudos que garantem que este cumpre com as especificações inicialmente estabelecidas. Assim sendo, tem-se um veículo totalmente elétrico, com dimensões 1.05×0.60×0.35 m (comprimento-largura-altura), terrestre com tração 6×6 capaz de atingir 20 km/h com capacidades anfíbias de deslocação independente em meio aquático até 4 nós, com uma autonomia total estimada de 90 minutos. Como trabalho futuro, estão planeadas análises computacionais estruturais e de fluidos de forma a melhorar a integridade e desempenho do veículo em diferentes cenários de missão.

**Palavras-chave:** veículo anfíbio elétrico não tripulado, *design* e desenvolvimento de produto, projeto conceptual.

#### 1. Introdução

De uma perspetiva histórica, a construção de veículos não tripulados solidificou-se com o início da Primeira Guerra Mundial, onde se começaram a utilizar veículos (inclusive aeronaves) controlados por rádio. Contudo, a origem dos veículos anfíbios verificou-se, como era de esperar, muito mais cedo. Inventaram-se alguns protótipos deste tipo de veículos no início do século XIX, sendo que a sua aplicação em operações militares, de investigação e de busca e salvamento cimentou-se também no fim da Primeira Grande Guerra.

Por sua vez, só no início dos anos 2000 é que se começou realmente a projetar e construir veículos anfíbios não tripulados, geralmente protótipos para investigação e auxílio a operações de busca e salvamento. Atualmente, existem vários projetos nesta área como os das empresas *Milanion*, *Clearpath Robotics* e *Ultrabeam Hydrographic*, geralmente classificados como Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNT) com capacidades anfíbias, ver Figura 1.



Figura 1 - Exemplo de Veículos Terrestres Anfíbios Não Tripulados: a) Argonaut da Ultrabeam Hydrographic; b) Moose da Clearpath Robotics

Posto isto, neste trabalho, o objetivo consiste em realizar o projeto conceptual de um veículo anfíbio não tripulado para a Marinha Portuguesa. Esta abordagem é realizada tendo em vista um veículo de baixo custo, adaptando-se aos meios de construção atualmente disponíveis, e que consiga prestar auxílio e tornar mais fáceis e seguras várias operações militares e de investigação.

Assim, serão estudadas diversas possibilidades quanto ao projeto do casco, do modo de locomoção tanto terrestre como aquático e dimensionamento dos motores e baterias. Em seguida, determinar-se-á a conjugação mais adequada tendo em conta os parâmetros escolhidos para a massa total, estabilidade, autonomia, tração e versatilidade do veículo.

Por fim, espera-se conseguir deixar este projeto numa fase em que, futuramente, seja possível avançar com a construção do mesmo.

## 2. Design e Desenvolvimento Conceptual

Apesar de haver distinção entre os conceitos de *project* e *design*, ambos os termos em português significam projeto. Por esta razão, é necessário em primeiro lugar, esclarecer as definições destes conceitos.

O processo de desenvolvimento ou projeto (*project*) de um produto é o processo completo que engloba três funções principais: *marketing*, *design* e manufatura.

Desta forma, verifica-se que o projeto (*design*) é efetivamente uma parte fundamental no desenvolvimento de um produto, mas, esta não engloba os aspetos relacionados com a parte financeira, comercial, logística, recursos humanos, etc. Entende-

---

se então por *design* unicamente o conjunto de processos, cálculos e planos que integram o projeto conceptual de um produto/objeto antes de ser produzido [1] – [2].

O processo de desenvolvimento conceptual engloba por sua vez diversas atividades/etapas deste a identificação das necessidades até à testagem e escolha das especificações finais. Por sua vez, para o presente projeto, foi criada seguindo o diagrama de etapas ilustrado na Figura 2.

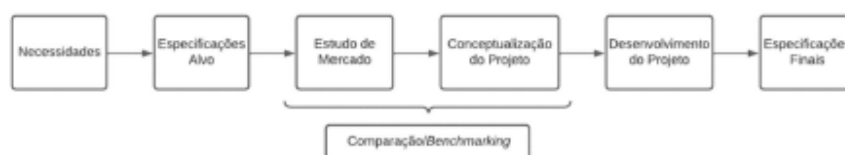


Figura 2 - Fases do processo de desenvolvimento conceptual

### 3. Necessidades e Especificações

Analisando a mais recente revisão da Diretiva Estratégica de Marinha 2018, realizada em 2021 (DEM 2018 REV 2021), conclui-se que a concretização deste projeto vai ao encontro de diversas Linhas de Ação dos Objetivos Estratégicos (OE) da Perspetiva Operacional. Nomeadamente,

- OE7 – OTIMIZAR a presença e o controlo nos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição nacional.
- OE8 – AUMENTAR a prontidão das unidades operacionais e o seu empenhamento no apoio à política externa.
- OE9 – CONSOLIDAR o conhecimento e a atuação no quadro das ciências do mar e da cultura marítima.

Assim, tendo em conta todas as restrições e fatores limitantes no acesso a diversos cenários de operações, o objetivo consiste na introdução de um meio inovador que permitirá à Marinha e às Forças Armadas um maior alcance em zonas estuarinas e costeiras. A criação deste projeto tem por motivação o apoio a operações anfíbias dos Fuzileiros e Mergulhadores, investigação hidrográfica, apoio à população em cheias e outras catástrofes naturais e também vigilância dos rios e suas margens, bem como de praias e zonas costeiras.

Desta forma, as necessidades para o projeto poderão ser resumidas em alguns pontos:

- Apoiar e aumentar a capacidade em operações militares;
- Cumprir a sua missão de forma a diminuir o risco para todos os operacionais envolvidos;
- Capacidade de atuar de forma eficiente tanto em terra como em água;
- Veículo pequeno para que possa ser facilmente transportado e operado;
- Veículo estanque.

Conclui-se por sua vez que, de forma a satisfazer as principais necessidades identificadas, as especificações alvo terão de ser as seguintes:

- Peso máximo  $\simeq 55$  kg;
- Meio de tração dedicado para deslocação terrestre;
- Velocidade máxima em terra de 20 km/h;
- Meio de deslocação dedicado na água;
- Velocidade máxima em água de 4 nós;
- Flutuabilidade e estabilidade dentro de autonomia;
- Autonomia superior a 1 h;
- Fonte de energia independente;
- Casco fabricado em material resistente.

#### **4. Projeto e Desenvolvimento**

O desenvolvimento do veículo é realizado recorrendo a diversos *softwares* de simulação numérica de forma a criar e avaliar o desempenho do mesmo.

Tendo como referência os veículos atualmente no mercado, ver Figura 1, começa-se por utilizar o programa *SolidWorks* para desenhar o casco e principais componentes do veículo, e.g., o casco ilustrado na Figura 3.

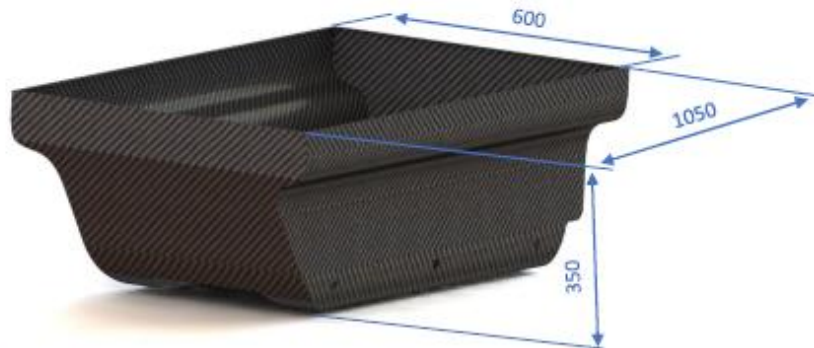


Figura 3 – Modelo CAD do casco do veículo desenvolvido em *SolidWorks* (dimensões em mm)

Seguidamente, são estudadas quais as opções mais adequadas quanto ao tipo de motores a utilizar. Com base numa análise preliminar, considera-se a utilização de seis rodas com motores elétricos independentes (um por roda) como meio de deslocação terrestre.

De forma a estimar a potência necessária e torque (binário) dos motores para a tração terrestre, consideram-se os seguintes parâmetros de estudo:

- Massa total do veículo;
- Velocidade nominal pretendida;
- Gradiente máximo;
- Diâmetro das rodas.

Em primeiro lugar, são calculadas as rotações por minuto,  $N_T$ , das rodas do veículo:

$$N_T = \frac{60v_N}{\pi D_W} \quad (1)$$

onde,  $v_N$  é a velocidade nominal e  $D_W$  é o diâmetro da roda.

Em segundo lugar, desprezando o atrito e a fricção entre componentes, é possível estimar o torque e potência do motor para que o veículo consiga transpor o gradiente máximo requerido. Em primeiro lugar é determinada a força total,  $F_T$ , necessária:

$$F_T = g k(m_V + m_L) \quad (2)$$

onde,  $g$  é a aceleração gravítica,  $k$  é o gradiente de inclinação,  $m_v$  é a massa do veículo e  $m_L$  é a massa da carga.

De forma conservadora, considera-se que o veículo irá subir o gradiente à velocidade máxima requerida, e então determina-se a potência total necessária para tal:

$$P_U = F_T v_N \quad (3)$$

Por fim, o torque resultante,  $T_T$ , é determinado através da seguinte equação:

$$T_T = \frac{1}{2} \times \frac{D_W}{2} F_T \quad (4)$$

Com base nas Eqs. (1) a (4), e considerando os valores dos parâmetros de projeto apresentados na Tabela 1, obtém-se uma potência estimada,  $P_U$ , de aproximadamente 250W para cada motor, ver Tabela 1.

Tabela 1 - Cálculos para a estimativa de potência dos motores

Parâmetros de projeto	Valor	Unidade	Parâmetros de saída	Valor	Unidade
$M_{estrutura}$	2.928	kg	N	353.32	rpm
$M_{motores}$	19.2	kg	F	269.69	N
$M_{bateria}$	20	kg	$P_T$	1496.79	W
$M_{payload}$	12.872	kg	$P_U$	249.47	W
$M_{total}$	55	kg	T	20.23	N-m
$v_N$	20	km/h			
Gradiente	50	%			
$D_W$	0.3	m			

Assim, garante-se que o veículo cumpre com os requisitos estabelecidos.

Concluído este passo, a seguinte fase do projeto consiste em inserir as rodas no modelo CAD do veículo, ver Figura 4, de forma a realizar um estudo das características hidrostáticas.



Figura 4 – Modelo CAD do Veículo Anfíbio Não Tripulado com rodas

Para realizar o estudo de velocidade vs. resistência, ver Figura 5, utiliza-se o *software ANSYS Fluent* [3], obtendo-se a distribuição de pressão no veículo permitindo estimar a potência necessária para praticar os 4 nós de velocidade requeridos.

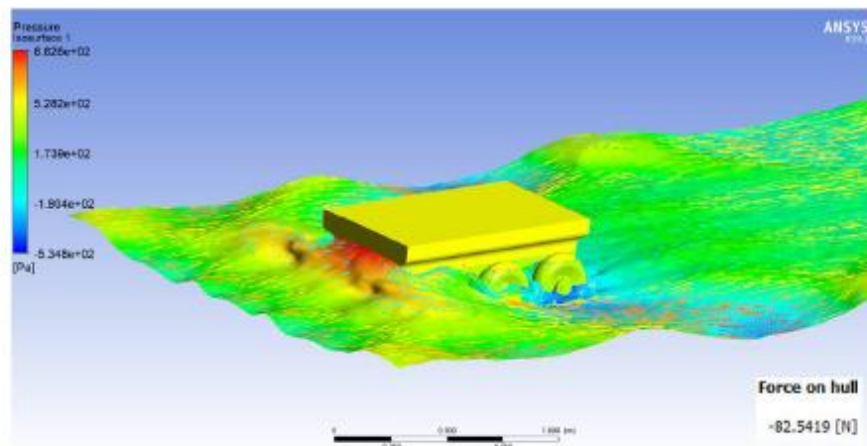


Figura 5 – Distribuição de pressão obtida através do *ANSYS Fluent*

A força de drag obtida no *ANSYS Fluent* é de sensivelmente 82.5 N, o que, considerando o funcionamento do veículo a sua autonomia máxima, ao longo de 90 minutos equivale a uma potência de aproximadamente 125 W.

Considerando que os sistemas propulsores terrestre e aquático podem estar a funcionar em simultâneo, o que pode ocorrer momentaneamente numa fase de transição terra-água ou água-terra, considera-se a soma das potências dos dois sistemas propulsores, i.e., 1625 W, para estimar a capacidade energética necessária para as baterias a realizar em trabalhos futuros.

As figuras seguintes ilustram o conceito do veículo aqui desenvolvido em senários de operação terrestre e marítimo.



Figura 6 – Exemplo de conceito final do Veículo Anfíbio Não Tripulado em terra



Figura 7 – Exemplo de conceito final do veículo numa operação de desembarque anfíbio

## 5. Conclusão e trabalhos futuros

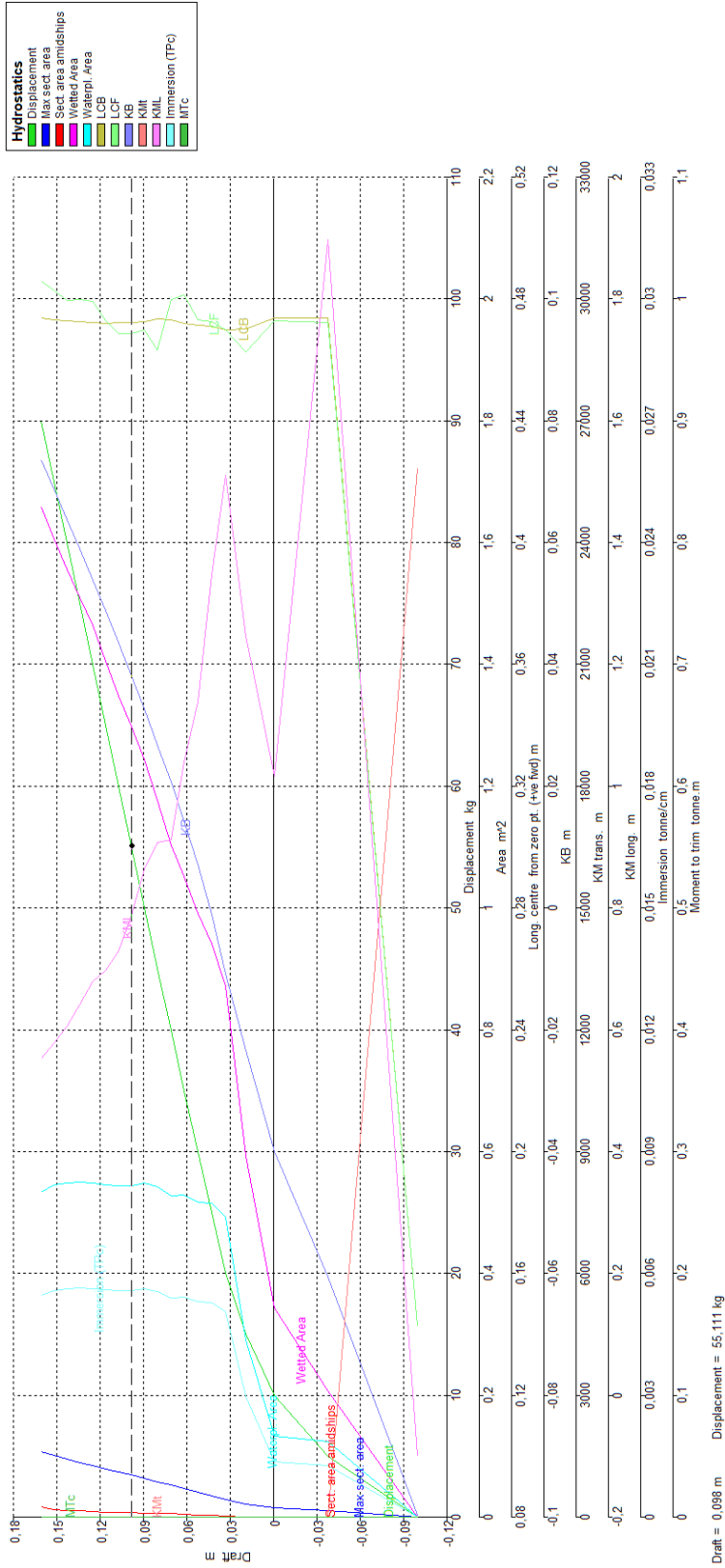
Até à data, foi possível concretizar uma parte do projeto pretendido tendo cumprido com os objetivos estabelecidos, tendo sido projetado com sucesso um veículo anfíbio que cumpre os requisitos estabelecidos no seu projeto conceptual. Os próximos passos serão a continuação do estudo do veículo, como por exemplo, escolha das baterias, estudos estruturais, de forma a consolidar o projeto e garantir a sua aplicabilidade nas missões para as quais foi projetado.

Por fim, espera-se conseguir deixar este projeto numa fase em que, futuramente, seja possível dar continuidade ao mesmo, podendo vir a ser realizadas dissertações onde se abordem temas tais como o controlo do veículo e a instalação de sensores e outros equipamentos, aumentando as suas capacidades e versatilidade.

### Referências Bibliográficas

- [1] Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th Edition - Knovel.
- [2] Ulrich KT, Eppinger SD, Yang MC. *Product Design and Development*, 7th Edition, 2020.
- [3] ANSYS Fluent 2019 R2 -Theory Guide.

# Apêndice B – Gráfico de Carenas Direitas retirado do *Maxsurf*



## Apêndice C – Dimensionamento dos Motores e Cálculo da Autonomia

Características do veículo			
M <sub>total</sub>	55 kg		
Capacidade total das baterias	80 Ah		
Eficiência de descarregamento da bateria	95 %		
Eficiência do motor elétrico	85 %		
Tensão do motor elétrico	48 V		
Fator de segurança	1,2		
Potência do motor aquático (8 nós)	1310 W		
<b>Segmento 1</b>			
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1
Distância	4000 m	Distância	400 m
Velocidade em terra	5,56 m/s	Velocidade em terra	4,17 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós
Inclinação	0 °	Inclinação	15 °
Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8
Tempo do percurso	0,20 h	Tempo do percurso	0,03 h
Potência dos motores terrestres	2399 W	Potência dos motores terrestres	2320 W
Capacidade das baterias	14,8 Ah	Capacidade das baterias	1,9 Ah
	18,55%		2,39%
Capacidade total consumida	79,96 Ah	Tempo total	1,11 h
	99,95 %		
<b>Segmento 2</b>			
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	0
Distância	4000 m	Distância	20000 m
Velocidade em terra	5,56 m/s	Velocidade em terra	0 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	8 nós
Inclinação	0 °	Inclinação	0 °
Coef. de atrito	0,6	Coef. de atrito	0
Tempo do percurso	0,20 h	Tempo do percurso	1,35 h
Potência dos motores terrestres	1799 W	Potência dos motores terrestres	0 W
Capacidade das baterias	11,1 Ah	Capacidade das baterias	54,7 Ah
	14 %		68 %
Capacidade total consumida	77,01 Ah	Tempo total	1,82 h
	96,3 %		

Perfil de Missão 1

Segmento 3		Segmento 4		Segmento 5		Segmento 6	
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1
Distância	4000 m	Distância	400 m	Distância	4000 m	Distância	400 m
Velocidade em terra	5,56 m/s	Velocidade em terra	4,17 m/s	Velocidade em terra	5,56 m/s	Velocidade em terra	4,17 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós
Inclinação	0 °	Inclinação	15 °	Inclinação	0 °	Inclinação	-15 °
Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8
Tempo do percurso	0,20 h	Tempo do percurso	0,03 h	Tempo do percurso	0,20 h	Tempo do percurso	0,03 h
Potência dos motores terrestres	2399 W	Potência dos motores terrestres	2320 W	Potência dos motores terrestres	2399 W	Potência dos motores terrestres	1160 W
Capacidade das baterias	14,8 Ah	Capacidade das baterias	1,9 Ah	Capacidade das baterias	14,8 Ah	Capacidade das baterias	1,0 Ah
	18,55%		2,39%		18,55%		1,20%

Perfil de Missão 2

Segmento 3		Segmento 4		Segmento 5		Segmento 6	
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1
Distância	4000 m	Distância	0 m	Distância	0 m	Distância	0 m
Velocidade em terra	4,17 m/s	Velocidade em terra	1 m/s	Velocidade em terra	1 m/s	Velocidade em terra	1 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós
Inclinação	0 °	Inclinação	0 °	Inclinação	0 °	Inclinação	0 °
Coef. de atrito	0,6	Coef. de atrito	0	Coef. de atrito	0	Coef. de atrito	0
Tempo do percurso	0,27 h	Tempo do percurso	0,00 h	Tempo do percurso	0,00 h	Tempo do percurso	0,00 h
Potência dos motores terrestres	1350 W	Potência dos motores terrestres	0 W	Potência dos motores terrestres	0 W	Potência dos motores terrestres	0 W
Capacidade das baterias	11,1 Ah	Capacidade das baterias	0,0 Ah	Capacidade das baterias	0,0 Ah	Capacidade das baterias	0,0 Ah
	14 %		0 %		0 %		0 %

Segmento 7		Segmento 8		Segmento 9	
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1
Distância	4000 m	Distância	400 m	Distância	4000 m
Velocidade em terra	5,56 m/s	Velocidade em terra	4,17 m/s	Velocidade em terra	5,56 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós
Inclinação	0°	Inclinação	-15°	Inclinação	0°
Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8	Coef. de atrito	0,8
Tempo do percurso	0,20 h	Tempo do percurso	0,03 h	Tempo do percurso	0,20 h
Potência dos motores terrestres	2399 W	Potência dos motores terrestres	1160 W	Potência dos motores terrestres	2399 W
Capacidade das baterias	14,8 Ah 18,55%	Capacidade das baterias	1,0 Ah 1,20%	Capacidade das baterias	14,8 Ah 18,55%

Segmento 7		Segmento 8		Segmento 9	
Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1	Deslocação (terra=1, água=0)	1
Distância	0 m	Distância	0 m	Distância	0 m
Velocidade em terra	1 m/s	Velocidade em terra	1 m/s	Velocidade em terra	1 m/s
Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós	Velocidade na água	0 nós
Inclinação	0°	Inclinação	0°	Inclinação	0°
Coef. de atrito	0	Coef. de atrito	0	Coef. de atrito	0
Tempo do percurso	0,00 h	Tempo do percurso	0,00 h	Tempo do percurso	0,00 h
Potência dos motores terrestres	0 W	Potência dos motores terrestres	0 W	Potência dos motores terrestres	0 W
Capacidade das baterias	0,0 Ah 0 %	Capacidade das baterias	0,0 Ah 0 %	Capacidade das baterias	0,0 Ah 0 %

## **Apêndice D – Software utilizado**

Neste apêndice apresenta-se listagem do software utilizado e respectivas versões.

- Maxsurf – versão v8i
- Solidworks – versão 2020
- Altair Simsolid – versão 2022.0.1
- Ansys Fluent – versão 19.2
- Microsoft Excel – versão 2206

# Anexos

## Anexo A – Datasheet Fibra de Carbono Zoltek™ PX35 P/TW28-50

### Zoltek™ PX35 P/TW28-50 Woven Carbon Fiber Fabric

**Categories:** [Carbon](#), [Carbon Fiber/Carbon Fibre](#), [Other Engineering Material](#), [Composite Fibers](#)

**Material Notes:** ZOLTEK PX35 Tow Weave Carbon Fabrics are produced from ZOLTEK PX35 50K Continuous Tow Carbon Fiber. Quick composite part build-up is cost effectively achieved with cosmetically attractive carbon fiber fabrics. Applications include large composite tooling parts and aesthetically appealing finished composite components.

Information provided by Zoltek Corporation.

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<a href="#">1.81</a> g/cc	<a href="#">0.0654</a> lb/in <sup>3</sup>	
Thickness	<a href="#">1500</a> microns	<a href="#">59.1</a> mil	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength	<a href="#">4137</a> MPa	<a href="#">600000</a> psi	Continuous Tow
Elongation at Break	<a href="#">1.5</a> %	<a href="#">1.5</a> %	Continuous Tow
Tensile Modulus	<a href="#">242</a> GPa	<a href="#">35100</a> ksi	Continuous Tow
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	<a href="#">0.00155</a> ohm-cm	<a href="#">0.00155</a> ohm-cm	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<a href="#">95</a> %	<a href="#">95</a> %	
Descriptive Properties			
Areal Weight	<a href="#">960</a> g/m <sup>2</sup>		
Construction	<a href="#">Plain or twill weave.</a>		
Fiber Diameter (µm)	<a href="#">7.2</a>		
Fill Yarn	<a href="#">1.5</a> /cm		
Roll Length	<a href="#">30</a> m		
Roll Width	<a href="#">1.27</a> m		
Warp Yarn	<a href="#">1</a> /cm		
Yarn	<a href="#">Zoltek PX35 50K tow with Epoxy sizing at 1.5%</a>		

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as any conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

# Anexo B – Datasheet Alumínio 7075 – T6

## Aluminum 7075-T6; 7075-T651

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [7000 Series Aluminum Alloy](#)

**Material Notes:** General 7075 characteristics and uses (from Alcoa): Very high strength material used for highly stressed structural parts. The T7351 temper offers improved stress-corrosion cracking resistance.

**Applications:** Aircraft fittings, gears and shafts, fuse parts, meter shafts and gears, missile parts, regulating valve parts, worm gears, keys, aircraft, aerospace and defense applications; bike frames, all terrain vehicle (ATV) sprockets.

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

**Composition Notes:**


A Zr + Ti limit of 0.25 percent maximum may be used with this alloy designation for extruded and forged products only, but only when the supplier and the purchaser have mutually agreed.

Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

**Key Words:** Aluminium 7075-T6; Aluminium 7075-T651, UNS A97075; ISO AlZn5.5MgCu; Aluminium 7075-T6; Aluminium 7075-T651; AA7075-T6; Al7075-T6

**Vendors:** [Click here](#) to view all available suppliers for this material.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<a href="#">2.81</a> g/cc	<a href="#">0.102</a> lb/in <sup>3</sup>	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	150	150	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	191	191	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	53.5	53.5	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	87	87	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	175	175	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	<a href="#">572</a> MPa	<a href="#">83000</a> psi	AA; Typical
	<a href="#">41.0</a> MPa	<a href="#">5950</a> psi	@Temperature 371 °C @Temperature 700 °F
	<a href="#">55.0</a> MPa	<a href="#">7980</a> psi	@Temperature 316 °C @Temperature 601 °F
	<a href="#">76.0</a> MPa	<a href="#">11000</a> psi	@Temperature 260 °C @Temperature 500 °F
	<a href="#">110</a> MPa	<a href="#">16000</a> psi	@Temperature 204 °C @Temperature 399 °F
	<a href="#">214</a> MPa	<a href="#">31000</a> psi	@Temperature 149 °C @Temperature 300 °F
	<a href="#">483</a> MPa	<a href="#">70100</a> psi	@Temperature 100 °C @Temperature 212 °F
	<a href="#">572</a> MPa	<a href="#">83000</a> psi	@Temperature 24.0 °C @Temperature 75.2 °F
	<a href="#">593</a> MPa	<a href="#">86000</a> psi	@Temperature -28.0 °C @Temperature -18.4 °F
	<a href="#">621</a> MPa	<a href="#">90100</a> psi	@Temperature -80.0 °C @Temperature -112 °F
	<a href="#">703</a> MPa	<a href="#">102000</a> psi	@Temperature -196 °C @Temperature -321 °F



σ <sub>u</sub>	r	
>= 462 MPa	>= 67000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 88.93 - 102 mm	@Thickness 3.501 - 4.00 in	
>= 490 MPa	>= 71100 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 76.23 - 88.9 mm	@Thickness 3.001 - 3.50 in	
>= 496 MPa	>= 71900 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 63.53 - 76.2 mm	@Thickness 2.501 - 3.00 in	
>= 510 MPa	>= 74000 psi	Sheet
@Thickness 0.203 - 0.279 mm	@Thickness 0.00800 - 0.0110 in	
>= 524 MPa	>= 76000 psi	Sheet
@Thickness 0.305 - 0.991 mm	@Thickness 0.0120 - 0.0390 in	
>= 524 MPa	>= 76000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 50.83 - 63.5 mm	@Thickness 2.001 - 2.50 in	
>= 531 MPa	>= 77000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 25.43 - 50.8 mm	@Thickness 1.001 - 2.00 in	
>= 538 MPa	>= 78000 psi	Sheet
@Thickness 1.02 - 3.17 mm	@Thickness 0.0400 - 0.125 in	
>= 538 MPa	>= 78000 psi	Sheet
@Thickness 3.20 - 6.32 mm	@Thickness 0.126 - 0.249 in	
>= 538 MPa	>= 78000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 6.35 - 12.7 mm	@Thickness 0.250 - 0.499 in	
>= 538 MPa	>= 78000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 12.7 - 25.4 mm	@Thickness 0.500 - 1.00 in	
Tensile Strength, Yield 503 MPa	73000 psi	AA; Typical
>= 372 MPa	>= 54000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 88.93 - 102 mm	@Thickness 3.501 - 4.00 in	
>= 400 MPa	>= 58000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 76.23 - 88.9 mm	@Thickness 3.001 - 3.50 in	
>= 421 MPa	>= 61100 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 63.53 - 76.2 mm	@Thickness 2.501 - 3.00 in	
>= 434 MPa	>= 62900 psi	Sheet
@Thickness 0.203 - 0.279 mm	@Thickness 0.00800 - 0.0110 in	
>= 441 MPa	>= 64000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 50.83 - 63.5 mm	@Thickness 2.001 - 2.50 in	
>= 462 MPa	>= 67000 psi	Sheet
@Thickness 0.305 - 0.991 mm	@Thickness 0.0120 - 0.0390 in	
>= 462 MPa	>= 67000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 6.35 - 12.7 mm	@Thickness 0.250 - 0.499 in	
>= 462 MPa	>= 67000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 25.43 - 50.8 mm	@Thickness 1.001 - 2.00 in	
>= 469 MPa	>= 68000 psi	Sheet
@Thickness 1.02 - 3.17 mm	@Thickness 0.0400 - 0.125 in	
>= 469 MPa	>= 68000 psi	Plate; T62, T651
@Thickness 12.7 - 25.4 mm	@Thickness 0.500 - 1.00 in	

Tensile Strength, Yield





>= 470 MPa	>= 69000 psi	Sheet
@Thickness 3.20 - 6.32 mm	@Thickness 0.126 - 0.249 in	
32.0 MPa	4640 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 271 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 520 °F	
45.0 MPa	6530 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 316 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 601 °F	
62.0 MPa	8990 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 260 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 500 °F	
87.0 MPa	12600 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 204 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 399 °F	
186 MPa	27000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 149 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 300 °F	
448 MPa	65000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 100 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 212 °F	
503 MPa	73000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature 24.0 °C	@Strain 0.200 %, Temperature 75.2 °F	
517 MPa	75000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature -28.0 °C	@Strain 0.200 %, Temperature -18.4 °F	
545 MPa	79000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature -80.0 °C	@Strain 0.200 %, Temperature -112 °F	
634 MPa	92000 psi	
@Strain 0.200 %, Temperature -196 °C	@Strain 0.200 %, Temperature -321 °F	
9.0 %	9.0 %	
@Temperature -196 °C	@Temperature -321 °F	
11 %	11 %	
@Temperature -80.0 °C	@Temperature -112 °F	
11 %	11 %	
@Temperature -28.0 °C	@Temperature -18.4 °F	
11 %	11 %	
@Temperature 24.0 °C	@Temperature 75.2 °F	
14 %	14 %	
@Temperature 100 °C	@Temperature 212 °F	
30 %	30 %	
@Temperature 149 °C	@Temperature 300 °F	
55 %	55 %	
@Temperature 204 °C	@Temperature 399 °F	
65 %	65 %	
@Temperature 260 °C	@Temperature 500 °F	
70 %	70 %	
@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
70 %	70 %	
@Temperature 371 °C	@Temperature 700 °F	
>= 3.0 %	>= 3.0 %	Plate; T62, T651
@Thickness 88.93 - 102.0 mm	@Thickness 3.501 - 4.015 in	

Elongation at Break



	102 mm	4.00 in	
	>= 5.0 %	>= 5.0 %	Sheet
	@Thickness 0.203 - 0.279 mm	@Thickness 0.00800 - 0.0110 in	
	>= 5.0 %	>= 5.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 50.83 - 63.5 mm	@Thickness 2.001 - 2.50 in	
	>= 5.0 %	>= 5.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 63.53 - 76.2 mm	@Thickness 2.501 - 3.00 in	
	>= 5.0 %	>= 5.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 76.23 - 88.9 mm	@Thickness 3.001 - 3.50 in	
	>= 6.0 %	>= 6.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 25.43 - 50.8 mm	@Thickness 1.001 - 2.00 in	
	>= 7.0 %	>= 7.0 %	Sheet
	@Thickness 0.305 - 0.991 mm	@Thickness 0.0120 - 0.0390 in	
	>= 7.0 %	>= 7.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 12.7 - 25.4 mm	@Thickness 0.500 - 1.00 in	
	>= 8.0 %	>= 8.0 %	Sheet
	@Thickness 1.02 - 3.17 mm	@Thickness 0.0400 - 0.125 in	
	>= 8.0 %	>= 8.0 %	Sheet
	@Thickness 3.20 - 6.32 mm	@Thickness 0.126 - 0.249 in	
	>= 9.0 %	>= 9.0 %	Plate; T62, T651
	@Thickness 6.35 - 12.7 mm	@Thickness 0.250 - 0.499 in	
	11 %	11 %	AA; Typical
	@Thickness 1.59 mm	@Thickness 0.0625 in	
	11 %	11 %	AA; Typical
	@Diameter 12.7 mm	@Diameter 0.500 in	
Modulus of Elasticity	71.7 GPa	10400 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Poissons Ratio	0.33	0.33	
Fatigue Strength	159 MPa	23000 psi	completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
	@# of Cycles 5.00e+8	@# of Cycles 5.00e+8	
Fracture Toughness	17.6 MPa-m <sup>1/2</sup>	16.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; S-L; average
	16.5 - 19.8 MPa-m <sup>1/2</sup>	15.0 - 18.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; S-L
	18.7 MPa-m <sup>1/2</sup>	17.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Forgings; S-L
	20.0 MPa-m <sup>1/2</sup>	18.2 ksi-in <sup>1/2</sup>	K(IC) in S-L Direction
	22.0 - 25.3 MPa-m <sup>1/2</sup>	20.0 - 23.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; T-L
	24.2 MPa-m <sup>1/2</sup>	22.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; T-L; average
	25.0 MPa-m <sup>1/2</sup>	22.8 ksi-in <sup>1/2</sup>	K(IC) in T-L Direction
	28.6 MPa-m <sup>1/2</sup>	26.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; L-T; average
	27.5 - 29.7 MPa-m <sup>1/2</sup>	25.0 - 27.0 ksi-in <sup>1/2</sup>	T651; Plate; L-T
	29.0 MPa-m <sup>1/2</sup>	26.4 ksi-in <sup>1/2</sup>	K(IC) in L-T Direction
Machinability	70 %	70 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.9 GPa	3900 ksi	
Shear Strength	331 MPa	48000 psi	AA; Typical
<b>Electrical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
Electrical Resistivity	0.00000515 ohm-cm	0.00000515 ohm-cm	AA; Typical
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F	
<b>Thermal Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>English</b>	<b>Comments</b>
CTE, linear	21.6 µm/m-°C	12.0 µin/in-°F	
	@Temperature -50.0 - 20.0 °C	@Temperature -58.0 - 68.0 °F	

	<a href="#">23.4</a> $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	<a href="#">13.0</a> $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	
	@Temperature 20.0 - 100 $^\circ\text{C}$	@Temperature 68.0 - 212 $^\circ\text{F}$	
	<a href="#">23.6</a> $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	<a href="#">13.1</a> $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	AA; Typical; average over range
	@Temperature 20.0 - 100 $^\circ\text{C}$	@Temperature 68.0 - 212 $^\circ\text{F}$	
	<a href="#">24.3</a> $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	<a href="#">13.5</a> $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	
	@Temperature 20.0 - 200 $^\circ\text{C}$	@Temperature 68.0 - 392 $^\circ\text{F}$	
	<a href="#">25.2</a> $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	<a href="#">14.0</a> $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	
	@Temperature 20.0 - 300 $^\circ\text{C}$	@Temperature 68.0 - 572 $^\circ\text{F}$	
Specific Heat Capacity	<a href="#">0.960</a> $\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$	<a href="#">0.229</a> $\text{BTU}/\text{lb}\cdot^\circ\text{F}$	
Thermal Conductivity	<a href="#">130</a> $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	<a href="#">900</a> $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$	AA; Typical at 77 $^\circ\text{F}$
Melting Point	<a href="#">477</a> - <a href="#">635.0</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">890</a> - <a href="#">1175</a> $^\circ\text{F}$	AA; Typical range based on typical composition for wrought products $\geq 1/4$ in. thickness. Homogenization may raise eutectic melting temperature 20-40 $^\circ\text{F}$ but usually does not eliminate it.
Solidus	<a href="#">477</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">890</a> $^\circ\text{F}$	AA; Typical
Liquidus	<a href="#">635.0</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">1175</a> $^\circ\text{F}$	AA; Typical

Processing Properties	Metric	English	Comments
Annealing Temperature	<a href="#">413</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">775</a> $^\circ\text{F}$	
Solution Temperature	<a href="#">466</a> - <a href="#">482</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">870</a> - <a href="#">900</a> $^\circ\text{F}$	
Aging Temperature	<a href="#">121</a> $^\circ\text{C}$	<a href="#">250</a> $^\circ\text{F}$	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	87.1 - 91.4 %	87.1 - 91.4 %	As remainder
Chromium, Cr	0.18 - 0.28 %	0.18 - 0.28 %	
Copper, Cu	1.2 - 2.0 %	1.2 - 2.0 %	
Iron, Fe	$\leq 0.50$ %	$\leq 0.50$ %	
Magnesium, Mg	2.1 - 2.9 %	2.1 - 2.9 %	
Manganese, Mn	$\leq 0.30$ %	$\leq 0.30$ %	
Other, each	$\leq 0.05$ %	$\leq 0.05$ %	
Other, total	$\leq 0.15$ %	$\leq 0.15$ %	
Silicon, Si	$\leq 0.40$ %	$\leq 0.40$ %	
Titanium, Ti	$\leq 0.20$ %	$\leq 0.20$ %	
Zinc, Zn	5.1 - 6.1 %	5.1 - 6.1 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MarWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MarWeb.