U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Projeto e Construção Mecânica

# Conceção de um sistema de monitorização da estrutura de um dispositivo submersível do tipo *Benthic Lander*

Aluno:

José Pedro Santos Alves Pereira

**Dissertação de Mestrado**

Orientador: Mário Augusto Pires Vaz

Coorientadores: Paulo Jorge Rosa Santos (DEC/FEUP);

Filipe Assis Gonçalves (INEGI)

23-07-2020

# RESUMO

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito das atividades do Projeto do INEGI AMALIA – 'Algae-to-Market Lab IdeAs' cujo principal objetivo é monitorizar e controlar o surgimento de algas invasivas no norte da Península Ibérica com o objetivo de tirar vantagens a nível económico.

O objetivo definido para este trabalho consiste na conceção de um sistema de monitorização para a estrutura de um *Benthic Lander* já projetada, concebida e testada em condições reais, sendo esta monitorização de elevada importância para prevenir eventuais futuros problemas na estrutura.

O primeiro passo realizado foi a recolha de informação relativamente ao estado da arte das tecnologias normalmente utilizadas na exploração do mar, bem como dos sistemas e métodos de monitorização mais comuns.

De seguida foi projetado e produzido um modelo à escala do *Benthic Lander* com o intuito de o mesmo ser testado no canal de ondas e correntes da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Posteriormente, foi definida uma matriz de ensaio que procura reproduzir condições de mar pardrão do mar português.

Foram em seguida realizados ensaios experimentais com o objetivo de recolher dados relativos ao comportamento da estrutura do *lander*. De referir que a matriz de ensaios inicial foi parcialmente executada tendo por base as características atuais do canal de ondas e correntes da FEUP. Para além da caracterização experimental do comportamento da estrutura, esses dados tinham como objetivo último a validação dos modelos numéricos a aplicar numa fase posterior.

Assim, e com o mesmo intuito dos ensaios experimentais, foram também executadas simulações numéricas com o objetivo de simular as solicitações em serviço, bem como para estudar a incorporação de sensorização na estrutura.

Finalmente, após a realização dos ensaios e executadas as simulações numéricas, foram feitas as respetivas análises de resultados e retiradas as conclusões que integram a parte final desta tese em conjunto com algumas sugestões de trabalhos futuros.

# AGRADECIMENTOS

Nesta secção gostaria de agradecer ao meu orientador e professor Mário Vaz por me ter possibilitado a oportunidade de desenvolver este projeto de dissertação de mestrado, e por sempre me ter ajudado ao longo de todo o trabalho.

Gostaria de agradecer ao meu coorientador Eng.º Filipe Gonçalves por todo o esforço que fez para me ajudar ao longo de todo o desenvolvimento da dissertação, bem como por toda a sua disponibilidade para me esclarecer dúvidas e guiar ao longo do projeto, pelo que esteve sempre incansável para me ajudar a desenvolver o melhor trabalho possível. Um agradecimento também ao Eng.º Tiago Morais, que também me proporcionou esta oportunidade, teve um papel importante na definição dos objetivos da dissertação, sendo que a sua ajuda foi também importante.

Gostaria de agradecer ao meu coorientador e professor Paulo Rosa Santos, pelo papel que teve na definição dos ensaios experimentais e pela preparação do laboratório para execução dos mesmos. Agradeço também aos membros do Laboratório de Hidráulica da SHRHA que ajudaram na execução dos ensaios.

A todas as pessoas do INEGI que de certa forma ajudaram ao longo do trabalho.

À FEUP, ao INEGI e ao Laboratório de Hidráulica da SHRHA.

Aos meus pais e irmãos, que tudo fizeram por mim, tanto a nível de educação como na minha formação académica.

# Conteúdo


**1 Introdução** **10**

1.1 Motivação e enquadramento . . . . . 11

1.2 Projeto AMALIA - INEGI . . . . . 11

1.3 Objetivos . . . . . 12

**2 Estado da Arte** **13**

2.1 Economia azul e tecnologia atual . . . . . 14

2.1.1 Submersíveis tripulados . . . . . 15

2.1.2 Veículos operados remotamente - ROV . . . . . 17

2.1.3 Submersíveis não tripulados . . . . . 18

2.1.3.1 Veículos subaquáticos autónomos . . . . . 18

2.1.3.2 Veículos subaquáticos híbridos operados remotamente . . . . . 20

2.2 *Benthic landers* . . . . . 22

2.2.1 História dos *landers* e papel recente na ciência . . . . . 23

2.2.2 Tipos de *landers* . . . . . 24

2.2.2.1 *Landers* de baixa profundidade . . . . . 25

2.2.2.2 *Landers* de médias profundidades . . . . . 25

2.2.2.3 *Landers* de alta profundidade . . . . . 25

2.2.3 Tipos estruturais de *landers* . . . . . 25

2.2.3.1 *Micro open-frame landers* . . . . . 25

2.2.3.2 *Macro open-frame landers* . . . . . 28

2.2.3.3 *Flat shape landers* . . . . . 31

2.2.4 Materiais aplicados em estruturas e equipamentos submarinos . . . . . 32

2.2.4.1 Materiais dos compartimentos . . . . . 35

2.2.5 Sistemas de variação de flutuabilidade utilizados . . . . . 36

2.2.5.1 Descida e aterragem . . . . . 37

2.3 Monitorização estrutural e prevenção de danos nos *landers* . . . . . 38

2.3.1 Fases da monitorização estrutural . . . 39
2.3.2 Vantagens da monitorização estrutural . . . 41
2.3.3 Componentes da monitorização estrutural . . . 41
2.3.4 Sensores utilizados na monitorização estrutural . . . 42
2.3.5 Obtenção dos dados . . . 45
2.3.6 Comparação da fiabilidade com e sem uso de monitorização estrutural . 46

**3 Caso de Estudo** **48**
3.1 Lander AMALIA e o seu objetivo . . . 49
3.2 Histórico do AMALIA . . . 50
3.3 Características do AMALIA . . . 50
3.3.1 Dimensões do AMALIA . . . 50
3.4 Material do AMALIA . . . 52
3.4.1 Características do POM . . . 53
3.5 Modelo à escala 1:9 . . . 53

**4 Ensaios Experimentais** **55**
4.1 Instrumentação necessária . . . 56
4.2 Verificações no canal de ondas e correntes . . . 56
4.3 Canal hidráulico de ondas e correntes . . . 57
4.4 Sistema de geração de ondas . . . 59
4.5 Matriz de ensaios à escala . . . 61
4.6 Realização dos Ensaios . . . 63
4.7 Resultados . . . 64

**5 Simulação Numérica** **66**
5.1 Simulação CFD - Ansys Fluent . . . 68
5.1.1 Geometria . . . 68
5.1.2 Malha . . . 70
5.1.3 Resultados da simulação em CFD . . . 75
5.1.3.1 Coeficiente de arrasto - Diferença entre o valor obtido e o valor tabelado . . . 75
5.1.3.2 Pressão estática e vetores de escoamento . . . 78
5.2 Simulação estrutural - Ansys Mechanical . . . 81
5.2.1 Pressões estáticas individuais . . . 81
5.2.2 Parâmetros da simulação . . . 82

5.2.3 Malha . . . . . 82
5.2.4 Resultados da simulação estrutural no Ansys Mechanical . . . . . 83
5.2.4.1 Deformação total - direção do escoamento, (0,0,-1) . . . . . 84
5.2.4.2 Tensão equivalente de *von Mises* - direção do escoamento, (0,0,-1) 84
5.2.4.3 Deformação total - direção perpendicular ao escoamento, (1,0,0) 87
5.2.4.4 Tensão equivalente de *von Mises* - direção perpendicular ao escoamento, (1,0,0) . . . . . 88
5.2.4.5 Deformação total - direção vertical, (0,-1,0) . . . . . 90
5.2.4.6 Comparação entre a tensão equivalente de von Mises e a tensão limite de escoamento . . . . . 90

**6 Análise de Resultados** **92**
6.1 Ensaios experimentais . . . . . 93
6.2 Simulação numérica . . . . . 93
6.2.1 Simulação em CFD - Ansys Fluent . . . . . 93
6.2.2 Simulação estrutural - Ansys Mechanical . . . . . 93

**7 Conclusão e Trabalhos Futuros** **96**

**Bibliografia** **98**

**Anexo** **102**

# Lista de Figuras


1.1 Logótipos do projeto AMALIA (à esquerda) e do INEGI (à direita) . . . . . 12

2.1 KIEL 6000 [11] . . . . . 18
2.2 AUV *Autosub6000* [12] . . . . . 19
2.3 AUV *Bluefin-21* [13] . . . . . 20
2.4 Veículo HROP *Nereus* configurado em modo ROV em cima (a) e em modo AUV em baixo (b) [14] . . . . . 21
2.5 Conceito de operação do HROP *Nereus* em modo ROV, modo no qual o *Nereus* é controlado remotamente através de um cabo leve, expansível e de fibra ótica, que liga o veículo à embarcação de suporte na superfície [14] . . . . . 22
2.6 Estrutura completa do lander ROBIO pronta a ser mergulhada [1][8] . . . . . 26
2.7 Lander ISIT [7] . . . . . 27
2.8 Lander MEDUSA modular [7] . . . . . 27
2.9 *Lander* DOBO de grande profundidade [7][8] . . . . . 28
2.10 *Lander* K/MT, da empresa KUM Kiel [8][17] . . . . . 29
2.11 *Lander* Wilmington da Universidade da Carolina do Norte [7] . . . . . 30
2.12 *Lander* DELOS [18] . . . . . 31
2.13 *Lander* TWERC a ser mergulhado (em cima) e a aterrar no fundo oceânico (em baixo) [7] . . . . . 32
2.14 *Lander* MSM - *Kongsberg Modular Subsea Monitoring* [7] . . . . . 32
2.15 Componentes da monitorização estrutural [21] . . . . . 42
2.16 Redes de *Bragg* [22]. . . . . 43
2.17 Configuração com utilização de sensor de emissão acústica [23]. . . . . 45
2.18 Comparação de estruturas com e sem uso de sistemas de monitorização estrutural, SHM [21] . . . . . 47

3.1 *Lander* AMALIA [25] . . . . . 49

3.2 Ângulo das pernas do AMALIA e altura do centro de gravidade em função das mesmas [26] . . . 51
3.3 Dimensões gerais do AMALIA em função do ângulo das pernas [27] . . . 51
3.4 Altura, diâmetro e altura do centro de gravidade do AMALIA em função do ângulo das pernas, $\theta$ [28] . . . 52
3.5 Modelo à escala 1:9 do *lander* no canal de ondas e correntes da FEUP . . . 54

4.1 Teste de visibilidade no tanque . . . 57
4.2 Configuração do canal de ondas e correntes após adaptações . . . 59
4.3 Sistema de geração de ondas [29]. . . . 60
4.4 As 3 orientações do *lander* AMALIA no canal - 90º, alinhado e desalinhado . . . 61

5.1 Módulo central que inclui a esfera do *lander* AMALIA . . . 68
5.2 Caixa/domínio do escoamento (a) e aproximação na peça (b) . . . 69
5.3 Malha 3 (a) e aproximação detalhada da malha 3 na vizinhança do objeto (b) . 71
5.4 Gráfico do coeficiente de arrasto da malha 3 . . . 73
5.5 Gráfico da força de arrasto da malha 3 . . . 73
5.6 Gráfico da pressão da malha 3 . . . 74
5.7 Influência da malha no valor do coeficiente de arrasto . . . 75
5.8 Valores do coeficiente de arrasto para diferentes tipos de objetos [37] . . . 76
5.9 Valores do coeficiente de arrasto de uma esfera em função do número de *Reynolds* [38]. . . . 76
5.10 Gráfico do valor do coeficiente de arrasto obtido para uma esfera lisa . . . 78
5.11 Contornos de pressão estática no módulo central (Valores em Pascal) . . . 79
5.12 Vetores de escoamento e valores da velocidade de corrente 1 [m/s] . . . 79
5.13 Vetores de escoamento e valores da velocidade de corrente 2 [m/s] . . . 80
5.14 Zonas turbulentas em cima . . . 80
5.15 Zonas turbulentas em baixo . . . 80
5.16 Malha gerada para a análise estrutural . . . 83
5.17 Deformação total obtida após a simulação na direção (0,0,-1) . . . 84
5.18 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) . . . 85
5.19 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para os componentes fabricados em POM . . . 85
5.20 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal - vista de cima . . . 86

5.21 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal - vista de baixo . . . . . 86
5.22 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal e a conexão entre o mancal e o garfo . . . . . 87
5.23 Deformação total obtida após a simulação na direção (1,0,0) . . . . . 87
5.24 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) . . . . . 88
5.25 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para os componentes fabricados em POM . . . . . 88
5.26 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal - vista de cima . . . . . 89
5.27 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal - vista de baixo . . . . . 89
5.28 Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal e a conexão entre o mancal e o garfo . . . . . 89
5.29 Deformação total obtida após a simulação na direção (0,-1,0) para o mancal . . 90

6.1 Representação esquemática da solução para a instalação das rosetas 1, 2 e 3 . . 95

7.1 Valores de pressão estática no mancal (valores em Pascal) . . . . . 102
7.2 Valores de pressão estática na ligação entre o garfo e o mancal (valores em Pascal) 102
7.3 Valores de pressão estática no garfo (valores em Pascal) . . . . . 103
7.4 Valores de pressão estática nos suportes da esfera (valores em Pascal) . . . . . 103
7.5 Valores de pressão estática nos aros (valores em Pascal) . . . . . 104
7.6 Valores de pressão estática na esfera (valores em Pascal) . . . . . 104
7.7 Força da gravidade atuante na estrutura . . . . . 105
7.8 Apoios no mancal . . . . . 105
7.9 Pressão hidrostática atuante na estrutura . . . . . 106
7.10 Pressão atuante sobre a esfera . . . . . 106
7.11 Pressão atuante sobre o aro . . . . . 107
7.12 Pressão atuante sobre os suportes da esfera . . . . . 107
7.13 Pressão atuante sobre o garfo . . . . . 108
7.14 Pressão atuante sobre a conexão entre o garfo e o mancal . . . . . 108
7.15 Pressão atuante sobre o mancal . . . . . 109

# Lista de Tabelas


1 Submersíveis tripulados [8] . . . . . 16
2 Tipos de ROV [8] . . . . . 17
3 Comparação do valor do módulo de elasticidade entre o aço inoxidável, alumínio, compósito, titânio e POM [15][19] . . . . . 33
4 Propriedades de materiais comuns no projeto de *landers* [15][19]. . . . . 35
5 Materiais tipicamente utilizados para compartimentos de pressão [9] . . . . . 35

6 Matriz das ondas regulares (60 a 70 ondas para cada caso) . . . . . 62
7 Matriz das ondas irregulares 1 . . . . . 63
8 Matriz das ondas irregulares 2 . . . . . 63

9 Malhas estudadas durante as simulações e características das mesmas . . . . . 70
10 Valores do coeficiente de arrasto, força de arrasto e pressão obtidos nas cinco malhas . . . . . 74
11 Valores da pressão estática máximos obtidos para o mancal, ligação garfo-mancal, garfo, suportes da esfera, aros e esfera . . . . . 81
12 Comparação entre o valor da tensão limite de escoamento do POM e do aço inoxidável utilizado para fabricar o garfo . . . . . 91
13 Comparação entre o valor do $\sigma_{max}$ do POM e do aço inoxidável utilizado para fabricar o garfo . . . . . 91

# Capítulo 1

# Introdução

## 1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

O papel do oceano na vida do ser humano é muito grande, desde o ar que respiramos até à meteorologia e avaliação de padrões climatéricos. Contudo, o conhecimento atual sobre os oceanos é ainda bastante limitado, pelo que a maior parte do conhecimento que se tem dos oceanos é referente a águas pouco profundas. Assim, apesar de cada vez mais se depender do oceano profundo para obtenção de alimento, energia e outros recursos, ele permanece um mistério [1].

Deste modo, a investigação do fundo oceânico depende muito da utilização de equipamentos de utilização remota, visto que a presença humana em zonas profundas é muito arriscada.

As estruturas *offshore* no geral atraem grandes investimentos de capital e requerem longos períodos de tempo para a sua construção, instalação e comissionamento. Na sociedade moderna, existem requisitos fundamentais para assegurar a saúde destas estruturas, entre elas a monitorização contínua e manutenção adequada [2].

Devido à crescente evolução e constantes desenvolvimentos das estruturas *offshore*, torna-se crescente a demanda por aperfeiçoamentos no projeto destas estruturas, bem como sistemas de monitorização da sua integridade estrutural.

Os avanços na monitorização estrutural, para além de ajudarem engenheiros a reconhecer fracas condições estruturais e outros problemas de segurança, ajudam também os profissionais a determinar potenciais riscos em estruturas, riscos que podem existir tanto devido ao envelhecimento das mesmas, como devido a fatores ambientais [2].

É por estas razões que se torna importante o estudo deste tipo de estruturas, bem como o desenvolvimento de sistemas de monitorização estrutural capazes de detetar falhas ou problemas nas mesmas, para que se possa manter um equilíbrio entre os custos de manutenção e a fiabilidade das estruturas no que toca à sua segurança.

## 1.2 PROJETO AMALIA - INEGI

A dissertação endereça o desenvolvimento de um sistema de monitorização estrutural para uma estrutura do tipo *Benthic Lander*, inserida no projeto do INEGI AMALIA – 'Algae-to-Market Lab IdeAs', cujos logótipos estão representados na figura 1.1:

**Figura 1.1:** Logótipos do projeto AMALIA (à esquerda) e do INEGI (à direita)

O projeto AMALIA conta com a participação de várias entidades, entre elas instituições de educação superior, unidades de investigação, empresas e, em particular o INEGI - Instituto De Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial.

O INEGI é "um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade - Indústria e vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial"[3].

No capítulo 3.2 faz-se uma breve explicação de como surgiu o projeto AMALIA e do seu histórico.

## 1.3 OBJETIVOS

Assim, o desenvolvimento deste trabalho implicou a concretização dos seguintes objetivos:

- Caracterizar o estado da arte sobre a tecnologia atual de veículos e *landers* utilizados no fundo do mar, bem como sobre a utilização de sistemas de monitorização estrutural;
- Estudar o *lander* AMALIA e as suas características;
- Realização de ensaios experimentais de um modelo à escala 1:9 para perceber o comportamento da estrutura submersa;
- Execução de simulações numéricas em computador;
- Análise dos dados obtidos;
- Conclusão relativa à incorporação de sensorização na estrutura do *lander*.

# Capítulo 2

# Estado da Arte

## 2.1 ECONOMIA AZUL E TECNOLOGIA ATUAL

A economia azul, que se define por todas as atividades económicas relacionadas com os oceanos, mares ou orlas costeiras, engloba uma ampla gama de setores já estabelecidos, bem como alguns emergentes, estando todos interconectados entre si. Dentro dos setores já estabelecidos, podem-se salientar seis, entre eles o setor dos recursos vivos marinhos, extração marinha de recursos não vivos, transporte marítimo, atividades portuárias, construção e reparação de navios, e turismo costeiro. A economia azul tem-se tornado cada vez mais importante nos dias que correm, visto que permite à sociedade extrair valor dos oceanos e das regiões costeiras. Pelo facto dos oceanos cobrirem cerca de 71% da superfície da Terra, os ecossistemas marinhos proporcionam serviços económicos e ambientais consideráveis [4].

Contudo, o valor extraído dos oceanos deve ter em conta a capacidade de os mesmos suportarem as atividades executadas. Deste modo, aumenta a necessidade de encontrar novas práticas sustentáveis, que permitam assegurar a "saúde"dos oceanos e ao mesmo tempo sustentar o potencial que estes oferecem [4], pelo que, “Economia azul é uma economia do mar sustentável, resultante do equilíbrio entre a atividade económica e a capacidade de longo prazo dos ecossistemas oceânicos para suportar essa atividade, permanecendo resilientes e saudáveis” [5].

De acordo com relatórios recentes, a economia azul europeia emprega mais de 4 milhões de pessoas, tendo gerado 658 mil milhões de euros de faturação e 180 mil milhões de euros em valor acrescentado bruto em 2017 [4]. Já no ano de 2018, a faturação chegou aos 750 mil milhões de euros e empregou cerca de 5 milhões de pessoas, o que representou um crescimento de cerca de 11.6% comparativamente ao ano anterior [6].

É assim de salientar que a economia azul representa uma indústria já muito valiosa e a expectativa de crescimento nos próximos anos é muito grande, sendo que alguns setores emergentes continuam a crescer, como as energias renováveis *offshore*, pelo que se espera que a União Europeia, que é líder em tecnologia de energia marinha, venha a produzir até 35% de toda a sua eletricidade a partir de estruturas *offshore* até 2050 [6].

A par do crescimento da economia azul, tem havido um constante desenvolvimento tecnológico, pelo que pode ser salientada o constante crescimento da tecnologia utilizada para a observação do mar em geral, bem como do fundo do mar em específico. Os equipamentos robotizados de utilização remota, como veículos operados remotamente, veículos subaquáticos autónomos ou os *landers* são ferramentas excelentes para a exploração do fundo do mar, até porque a presença humana nestas zonas é difícil e envolve muitos riscos. Sendo assim, a exploração do fundo do mar depende muito destes equipamentos para um

elevado número de tarefas, existindo vários tipos de submersíveis que podem ser utilizados, mediante as condições e os resultados pretendidos [7].

Apesar desta dissertação de mestrado ter como foco principal os *landers*, sendo que incide no estudo do *lander* AMALIA, considerou-se ser interessante fazer também um breve estudo dos vários veículos e dispositivos que são utilizados atualmente para o estudo e investigação do fundo do mar, já que o objetivo do *lander* AMALIA é monitorizar e controlar o surgimento de algas invasivas no mesmo. Sendo assim, foram estudados primeiramente os submersíveis tripulados, os veículos operados remotamente, ROV's, e os veículos subaquáticos autónomos, AUV's, com o objetivo de perceber qual a tecnologia utilizada na exploração do fundo do mar em geral.

### 2.1.1 Submersíveis tripulados

Os submersíveis tripulados são o tipo de submersíveis que são operados por pelo menos um operador que viaja pelo fundo do mar, podendo estes ser divididos em dois grupos: Grupo 1 - Oceano Profundo, para profundidades de trabalho superiores entre os 200 e os 6000 metros; e Grupo 2 - Profundidade Hadal, para profundidades de trabalho entre os 6000 e 11000 metros. Todo este conjunto de submersíveis tripulados permite que seja explorado aproximadamente 98% do fundo oceânico.

Na realidade, esta tecnologia de submersíveis tripulados apresenta muitas vantagens, como por exemplo o facto de ser possível ter em conjunto o "olho, a mão e o cérebro"humano no ponto de observação, o que significa a possibilidade de ter um contacto mais direto com o que se pretende observar, bem como permite recolher mais detalhes e aumenta a precisão quando comparado com sistemas remotos menos sofisticados. Para além disso, a capacidade de reação e alteração dos planos de ação torna-se muito maior quando se depara com uma alteração brusca das condições de trabalho [8]. Contudo, existem algumas desvantagens. Os submersíveis tripulados requerem sistemas de segurança e de suporte de vida altamente complexos e de elevado custo de aquisição e manutenção, razão porque muitas vezes não são selecionados para a exploração oceânica. Para além disso, são sistemas cuja utilização envolve alguns riscos para a vida do operador. Na utilização destes equipamentos existe a possibilidade de implosão caso tenha ocorrido um erro de cálculo durante o projeto da esfera; risco de congelamento; risco de incêndio; risco de ficar à deriva, caso apenas algumas das poitas sejam libertadas, causando o submersível de ficar perdido na coluna de água; além de situações de hipotermia ou hipertermia para o operador. Isto faz com que sejam necessárias precauções extra, de forma a assegurar a segurança dos operadores e da equipa

técnica, o que limita bastante as capacidades e aumenta o custo deste tipo de veículos [8]. Na realidade, qualquer missão que utilize submersíveis tripulados necessita de uma grande embarcação de suporte à superfície para os processos de implantação e recuperação dos mesmos, o que significa mais mão de obra e mais custos [9].

Outra desvantagem que deve ser mencionada é o tempo limitado em que se pode operar estes equipamentos. Um exemplo disso é um dos mais conhecidos projetos de submersíveis tripulados, o *Deepsea Challenger*, que resultou na exploração do ponto mais profundo da Fossa das Marianas, a cerca de 10984 metros de profundidade. Neste caso, o operador teve apenas 6 horas para explorar o local e encontrar novas formas de vida. Deve ser também mencionado o tempo de descida do aparelho, que foi de 2 horas e 30 minutos, e o tempo de ascensão, que foi de 1 hora e 10 minutos [10]. Estes tempos provam que o tempo de operação é extremamente limitado, pois devem ser considerados os tempos de descida e de ascensão [9].

Na tabela 1 podem ser observados alguns modelos de submersíveis tripulados, incluindo o *Deepsea Challenger*, bem como algumas das suas características:

**Tabela 1:** Submersíveis tripulados [8]

| Submersível | | | |
|---|---|---|---|
| | Deepsea Challenge | JIAOLONG | SHINKAI 6500 |
| Profundidade | 11000 m | 7000 m | 6500 m |
| Operador | *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI) | *China National Deep Sea Centre* | *Japan Agency for Marine-Earth Science & Tech* (JAMSTEC) |
| País | EUA | China | Japão |
| Submersível | | | |
| | MIR 1 | NAUTILE | ALVIN |
| Profundidade | 6000 m | 6000 m | 4450 m |
| Operador | *PP Shirshov Inst. of Oceanology* (RAS) | IFREMER | *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI) |
| País | Rússia | França | EUA |

### 2.1.2 Veículos operados remotamente - ROV

Os veículos operados remotamente, ROV (*Remotely Operated Vehicle*), são veículos subaquáticos que permitem ao operador do veículo manter-se num ambiente seguro enquanto o veículo trabalha em ambientes perigosos no fundo do mar.

Estes sistemas são compostos basicamente por um veículo com ligação à cabine / embarcação de controlo por um cordão umbilical, que inclui os cabos responsáveis por transmitir os dados de vídeo e sinal entre o veículo e o operador. Para além disso, deve também transmitir energia elétrica, possuir um sistema de lançamento, fontes de alimentação e um sistema de manejo dos cabos de controlo. Caso necessário, deve ser também montado no veículo equipamento adicional para recolher dados, como por exemplo câmaras de vídeo, sistemas de sonar, luzes ou braços articulados.

Os ROV são muito lentos devido ao arrasto sofrido pelo veículo e cordão umbilical, contudo podem ser movidos com liberdade total em todos os graus de liberdade.

Os sistemas ROV podem ser divididos em vários grupos, que se mostram na tabela 2:

**Tabela 2:** Tipos de ROV [8]

| Classe | Profundidade | Tipo | Potência | Observações |
|---|---|---|---|---|
| Micro Observação | <100 m | - Baixo custo<br>- Pequeno<br>- Elétrico | <5 hp | - Pesa menos do que 3 kg<br>- Uma alternativa a merguladores,<br>para zonas onde pode não conseguir chegar |
| Mini Observação | <300 m | - Pequeno<br>- Elétrico | <10 hp | - Pesa cerca de 15 kg |
| Classe de trabalho Leve/Média | <2000 m | - Médio<br>- Elétrico / Híbrido | <100 hp | - Pode ser construído em polímero |
| Classe de trabalho de Observação/Leve | <3000 m | - Grande capacidade<br>- Elétrico | <20 hp | |
| Classe de trabalho pesada/Carga elevada | <3000 m | - Grande capacidade<br>- Elétrico / Híbrido | <300 hp | |
| Observação/Coleção de dados | >3000 m | - Ultra profundo<br>- Elétrico | <25 hp | |
| Classe de trabalho pesada/Carga elevada | >3000 m | - Ultra profundo<br>- Elétrico / Híbrido | <120 hp | |

Na tabela 2 pode observar-se a classe de ROV, a profundidade a que opera, o tipo, a

potência, bem como algumas observações finais.

Um exemplo de ROV com capacidade de superar os 3000 metros de profundidade é o KIEL 6000, que foi desenhado com propósitos científicos e é capaz de chegar aos 6000 metros de profundidade. Este veículo é operado remotamente, através de um cabo de fibra ótica, e está representado na figura 2.1:

**Figura 2.1:** KIEL 6000 [11]

Este veículo pode, na realidade, fazer exploração em mais de 90% da extensão do fundo oceânico [8].

### 2.1.3 Submersíveis não tripulados

#### 2.1.3.1 Veículos subaquáticos autónomos

Os veículos subaquáticos autónomos, AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), são veículos autopropulsionados e não tripulados que são normalmente lançados/libertados a partir de uma embarcação à superfície e podem operar de forma independente da embarcação por períodos que podem variar desde algumas horas até dias. A maior parte tem a forma de um torpedo, no entanto alguns apresentam uma configuração mais complexa, permitindo que se movam de forma mais lenta e em terrenos mais irregulares.

Os AUVs seguem um trajeto pré-programado e podem navegar usando i) uma série de sinais luminosos no fundo oceânico ou ii) uma combinação de comunicação acústica *Ultra Short Base Line*, posicionamento GPS e navegação Inercial (que se baseia em reconhecimento baseado numa combinação de sensores de profundidade, sensores inerciais e sensores de velocidade Doppler).

Quando comparados com os ROVs, os AUVs não estão ligados por um cordão umbilical à embarcação de controlo, o que apresenta vantagens e desvantagens. Apesar da potência ser menor e de não ser possível uma transmissão de dados em tempo real, a velocidade, mobilidade e alcance é muito superior nos AUVs, sendo que estes são capazes de manter trajetórias linerares, pelo que são mais indicados para aplicações geocientíficas que requeiram profundidade constante, ao contrário dos ROVs que devido à impulsão causada pelo sistema de flutuabilidade apresentam uma trajetória ondulada.

Dependendo da sua resistência à pressão, os AUVs utilizados para investigação científica podem operar a profundidades até 6000 metros. A capacidade destes veículos de operarem relativamente perto do fundo oceânico, isto é, a menos de 5 metros do fundo oceânico em zonas de baixo relevo, significa que são potencialmente capazes de desenhar mapas, perfis e dados de imagem dos fundos oceânicos com uma resolução espacial e uma precisão muito superior, na ordem de 2 ordens de grandeza, quando comparados com embarcações que estejam à superfície.

Os AUVs podem operar em qualquer local, sendo que devem ser tidos em conta vários fatores durante o planeamento da missão. Tipicamente, podem deslocar-se até uma velocidade máxima de 1.5-2 m/s, podendo ser influenciadas pelas correntes que se verificam no local. Estas correntes, se demasiado fortes, podem mesmo ter um impacto negativo, levando, por exemplo, ao veículo a ficar à deriva e perder o controlo, o que implica a uma enorme perda de qualidade dos dados adquiridos [12].

Na figura 2.2 é apresentado um exemplo de AUV, o *Autosub6000*, que pode ser equipado com múltiplos sistemas de transmissão de dados para exploração marinha. Este veículo tem 5,5 metros de comprimento e pesa cerca de 1800 kg. As suas capacidades incluem precisão de navegação e de capacidade para seguir os terrenos desejados, um sistema para evitar colisões sofisticado e a possibilidade de explorar profundidades até 6000 metros.

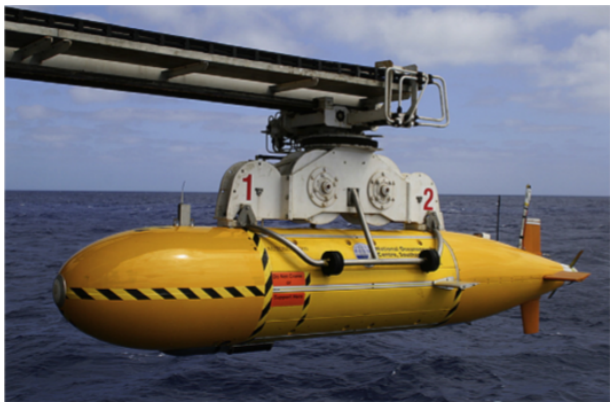



**Figura 2.2:** AUV *Autosub6000* [12]

Outro exemplo passível de menção é o *Bluefin-21*, um AUV altamente modular capaz de transportar múltiplos sensores e sistemas de transmissão de dados. A sua capacidade energética é tal que permite executar operações mais extensas mesmo a grandes profundidades. Algumas das suas aplicações incluem: [13]

- Procura e salvamento;
- Arqueologia e exploração;
- Oceanografia;
- Navios de contramedidas para minas, para localização e destruição de minas navais;
- Deteção e desarme de munição não detonada, que são armas explosivas, especificamente bombas, granadas, projéteis, minas navais ou outros equipamentos de guerra que não detonaram durante o conflito no qual foram utilizadas e que permanecen no terreno, à superfície ou enterradas, durante anos ou mesmo décadas.

O AUV *Bluefin-21* está representado na figura 2.3:

**Figura 2.3:** AUV *Bluefin-21* [13]

#### 2.1.3.2 Veículos subaquáticos híbridos operados remotamente

Outro tipo de tecnologia são os veículos híbridos operados remotamente, os HROP (*Hybrid Remotely Operated Vehicle*). Sendo uma mistura entre os AUV's e os ROV's, este tipo de veículos é capaz de operar nesses dois modos distintos, sendo que o objetivo é poder operar de forma independente como um AUV para áreas mais profundas e extensas com sonares e câmaras de vídeo, bem como poder operar como um ROV para permitir recolha de imagens e amostras mais próximas.

Um exemplo destes veículos é o projeto *Nereus*, que possibilitou à comunidade oceanográfica dos EUA ter o primeiro veículo economicamente eficiente para pesquisa científica de rotina, testes experimentais no fundo do mar e recolha de amostras do fundo oceânico até em locais com cerca de 11000 metros de profundidade.

Nas duas figuras (a) e (b) da figura 2.4, pode observar-se o veículo *Nereus*. Na de cima observa-se o *Nereus* configurado em modo ROV com um cabo de fibra ótica leve, um braço robótico, equipamento de recolha de amostras e câmaras de vídeo adicionais para obtenção remota de imagens e amostras, sendo que na de baixo observa-se o mesmo mas configurado em modo AUV para operações de investigação em modo autónomo [14].

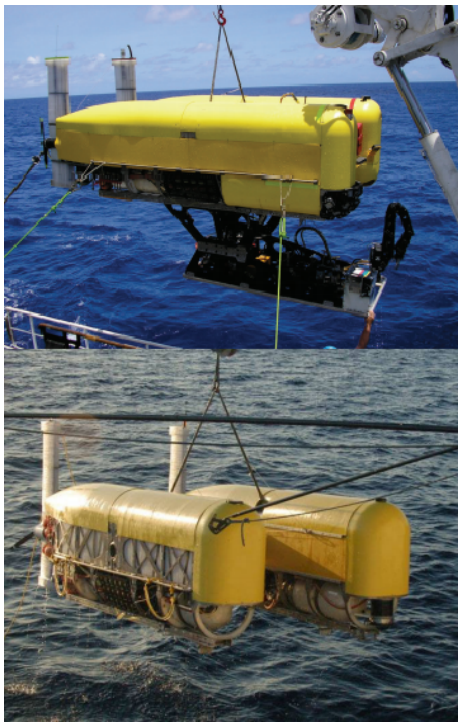


**Figura 2.4:** Veículo HROP *Nereus* configurado em modo ROV em cima (a) e em modo AUV em baixo (b) [14]

Na figura 2.5 pode-se observar um esquema da operação do HROP *Nereus* em modo ROV:

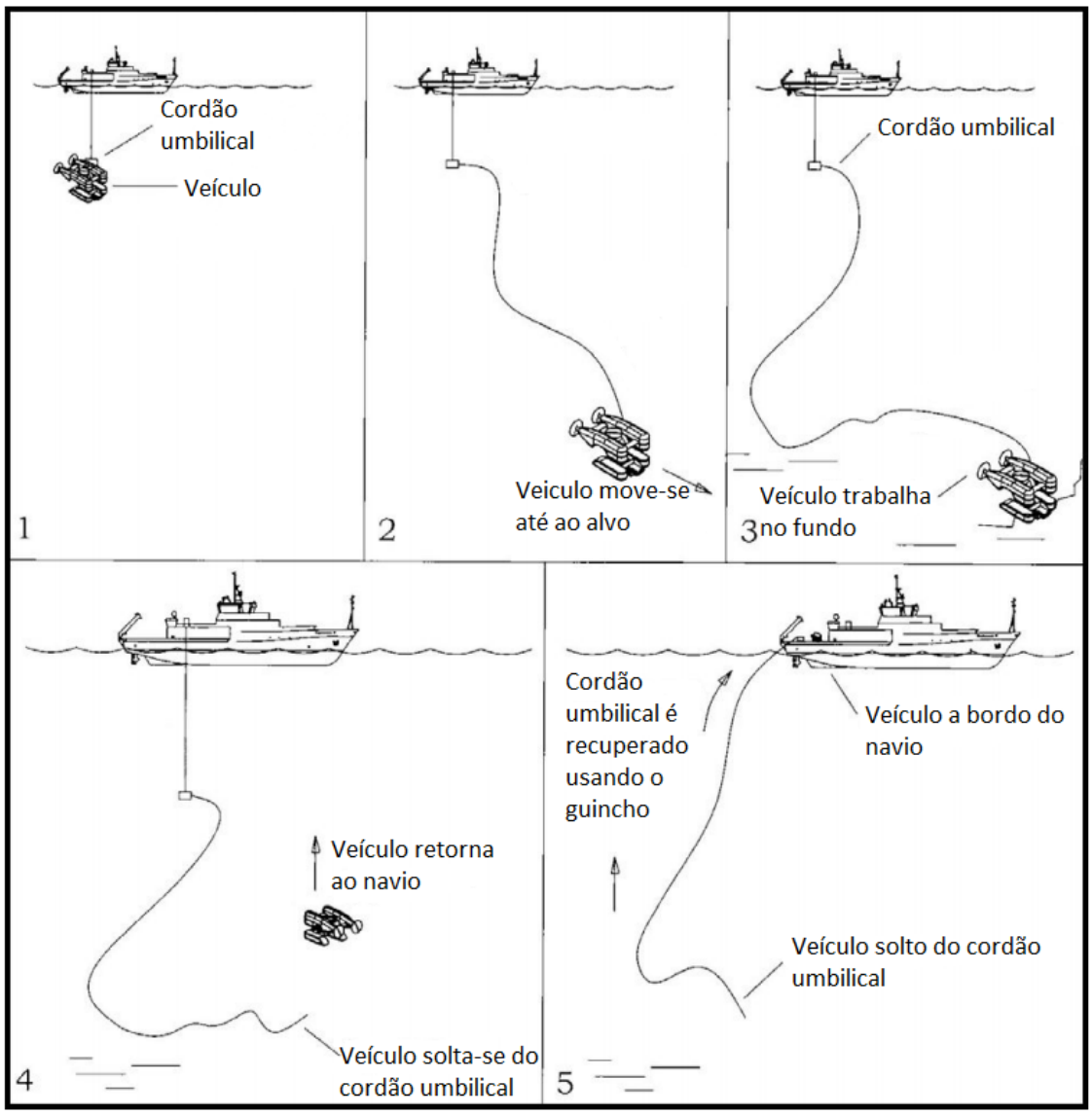



**Figura 2.5:** Conceito de operação do HROP *Nereus* em modo ROV, modo no qual o *Nereus* é controlado remotamente através de um cabo leve, expansível e de fibra ótica, que liga o veículo à embarcação de suporte na superfície [14]

## 2.2 *Benthic landers*

*Benthic lander*, ou apenas *lander*, é o termo geral usado para designar qualquer veículo autónomo, não tripulado de investigação oceanográfica que é largado da superfície e desce "em queda livre" até ao fundo oceânico sem estar ligado a nenhum cabo de suporte, e destinado a operar independentemente no fundo oceânico. Para a ascensão, são libertadas as poitas por um dispositivo pré-programado ou através de um comando acústico transmitido

a partir da superfície. O *lander* sob a ação da força de impulsão regressa à superfície devido à sua flutuabilidade positiva.

Outros termos que foram também utilizados para designar este tipo de veículos são "*Freefall vehicle*"e "*Pop-up vehicle*.

Existem vários exemplos deste tipo de veículos que podem ser mencionados, sendo que os *landers* têm sido utilizados para várias aplicações, entre elas:

- Monitorização das camadas nefeloides (camada de água na bacia oceânica profunda, acima do fundo do oceano, que contém quantidades significativas de sedimentos em suspensão. Tem entre 200 a 1000 m de espessura);
- Recolher amostras de água na camada limite;
- Medições de longo prazo das correntes e marés no fundo oceânico;
- Registo da atividade microsísmica;
- Rastreio e análise de seres marinhos no fundo do mar, bem como estimar a sua abundância;
- Captura de imagens em *time-lapse* da atividade no fundo oceânico. [15]

Na realidade, as operações com *landers* podem ter durações diferentes. Para estudos biológicos, normalmente são de alguns dias, no entanto, para estudos físicos da oceanografia podem durar vários anos [8].

### 2.2.1 História dos *landers* e papel recente na ciência

A investigação dos *landers* tem ganho bastante ímpeto no passado recente, que tem sido potenciado pelo sucesso comercial da implementação da tecnologia AUV.

Na realidade, os *landers* começaram a ser desenvolvidos após as primeiras tentativas de observar o fundo oceânico através de veículos tripulados, como por exemplo o projeto de Otis Barton e William Beebe, que tiverem auxílio de uma embarcação de suporte à superfície em 1930, bem como após o desenvolvimento dos ROV's, que começou por volta de 1960 [9].

Visto que os estudos oceanográficos nestas alturas eram mais baseados em observações e amostras aleatórias de forma qualitativa, foi sendo necessário evoluir a tecnologia, pelo que foram surgindo melhores sensores e uma navegação acústica mais desenvolvida, a par da evolução da computação [9].

Foi assim que, nos últimos 20 anos do século XX se começou a ver o desenvolvimento da tecnologia AUV e o surgimento dos primeiros *landers*, tornado possível através da evolução de computadores digitais, baterias eficientes e materiais estruturais de melhor qualidade [9].

Os *landers* permitiram ultrapassar os problemas inerentes aos veículos tripulados e aos ROV's, podendo-se deste modo executar missões de forma independente, analogamente aos veículos espaciais remotos [9].

Alguns desafios que foram necessários superar antes desta tecnologia começar a funcionar resultaram do facto das ondas eletromagnéticas (incluindo a luz) se atenuarem rapidamente dentro da água, e, por conseguinte, não poderem ser utilizadas para comunicar com o dispositivo. A alternativa desenvolvida foi baseada em sinais acústicos que, no cenário ideal, têm largura de banda bastante limitada e grandes *delays*, o que impede de ter qualquer controlo do dispositivo em tempo real [9].

Deste modo foi necessário desenvolver uma tecnologia que permitisse aos *landers* incorporar um microprocessador com dimensões pequenas o suficiente para poder ser colocado num dispositivo com pouca capacidade energética. Para além disso, o aparecimento de espumas sintáticas nos anos 60 permitiu melhorar a flutuabilidade dos dispositivos sem serem necessários grandes vasos de pressão, que permitem variar o volume do *lander* e assim alterar a sua flutuabilidade, reduzindo o tamanho dos mesmos [9].

O resultado de toda esta evolução foi a construção de dispositivos que poderiam ser suspensos nas bordas de navios mais pequenos, colocados no mar quando necessário efetuar missões e serem recuperados quando estas eram finalizadas. O tamanho necessário para as equipas técnicas deixou de ser tão grande, e enquanto o *lander* estivesse ocupado em missões, a embarcação de suporte poderia ser utilizada noutras atividades [9].

Apesar de todas estas vantagens comparativamente a outras tecnologias, os *landers* não viriam a substituir por completo os submersíveis tripulados e os ROV's. As equipas científicas, para ter sucesso, necessitariam dos 3 tipos de dispositivos mencionados para tirar partido de todas as suas vantagens [9], sendo que a maior parte do trabalho relacionado com operações em oceano profundo utilizando este tipo de equipamentos insere-se na indústria petrolífera e do gás [7].

### 2.2.2 Tipos de *landers*

A maioria dos *landers* pode ser classificada numa das seguintes categorias:

#### 2.2.2.1 *Landers* de baixa profundidade

Os *landers* de baixa profundidade podem ser operados até um máximo de 500 metros de profundidade, numa zona próxima da costa.

Neste caso, as cargas principais aplicadas na estrutura são forças dinâmicas causadas por correntes, sendo então necessário minimizar a área projetada de todo o equipamento de forma a reduzir o efeito de arrasto (*drag*). Quanto à pressão hidrostática, ela é negligenciável, visto que as profundidades são baixas.

Visto que estes *landers* são, de um modo geral, pequenos, o equipamento de alimentação que podem carregar pode limitar as operações [9].

#### 2.2.2.2 *Landers* de médias profundidades

Os *landers* de médias profundidades têm a capacidade de operar até 2500 metros e são, tipicamente, utilizados para pesquisas e investigações em locais não muito profundos. São já estruturas mais volumosas de forma a suportar as pressões hidrostáticas mais elevadas. No entanto o efeito de arrasto já é negligenciável pois as correntes nestas profundidades são muito fracas, pelo que área deixa de ser um fator tão importante a ter em conta [9].

#### 2.2.2.3 *Landers* de alta profundidade

Nesta categoria, os *landers* podem ser utilizados em profundidades de mais de 2500 m. Toda a estrutura deste tipo de *landers* deve ser robusta para suportar as enormes pressões hidrostáticas verificadas nestas profundidades.

Os *landers* desta categoria são usualmente utilizados perto do fundo oceânico para pesquisas de alta resolução [9].

### 2.2.3 Tipos estruturais de *landers*

Em termos estruturais, existem diferentes tipos de *landers*, com uma grande variedade de formas e tamanhos, dependendo da aplicação a que se destinam:

#### 2.2.3.1 *Micro open-frame landers*

Este tipo de *landers* apresenta uma estrutura aberta, sendo bastante modular e capaz de carregar instrumentação para monitorizações e medições *in situ*.

A forma da estrutura permite minimizar os efeitos das forças de arrasto devido às correntes marinhas, sendo que a estrutura aberta permite que a água flua por entre a estrutura

e a instrumentação. Deve incluir poitas na base para que sejam libertadas e deixadas no fundo do mar após a operação para que possa regressar à superfície.

Alguns exemplos deste tipo de *landers* são:

- **ROBIO** - *Robust BIOdiversity lander*

Capaz de alcançar os 3000 m de profundidade e incorpora uma câmara de vídeo para efetuar estudos de biodiversidade na vizinhança de zonas de extração de petróleo.

O ROBIO transporta também outro equipamento capaz de medir a velocidade e direção da corrente, bem como a salinidade do mar na zona em questão.

Na figura 2.6 pode-se observar o ROBIO pronto a ser mergulhado:

**Figura 2.6:** Estrutura completa do lander ROBIO pronta a ser mergulhada [1][8]

O ROBIO pode ser mergulhado de duas maneiras diferentes:

- Amarrado e colocado 2 metros acima do fundo do mar com a câmara apontada diretamente para baixo em direção a um isco, que atrai variadas espécies de peixes, para ser utilizado na monitorização da vida marinha;
- Colocado no fundo do mar com a câmara apontada para a frente, capturando imagens em *time-lapse* da fauna existente.

[16]

- **ISIT**

Outro exemplo de *lander* com estas características estruturais é o ISIT (*Intensified Silicon Intensifier Target*), representado na figura 2.7, que foi concebido para estudar bioluminescência espontânea e estimulada na coluna de água e na camada limite até profundidades um pouco acima de 4000 metros:

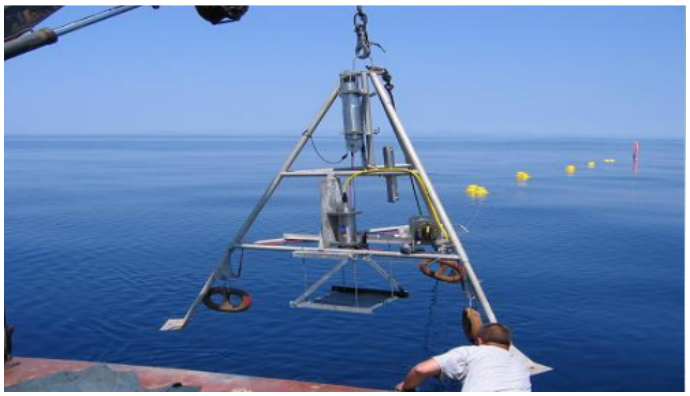


**Figura 2.7:** Lander ISIT [7]

- **MYRTLE** - *Multi-Year Return Tide Level Equipment*

Este *lander* é utilizado em águas profundas e destinado a medir pressões e profundidades. Foi concebido para permanecer no fundo oceânico por 5 anos e libertar cápsulas de dados gradualmente.

Existe mesmo uma versão mais recente do *lander*, o MYRTLE-X, capaz de permanecer 10 anos mergulhado.

- **MEDUSA**

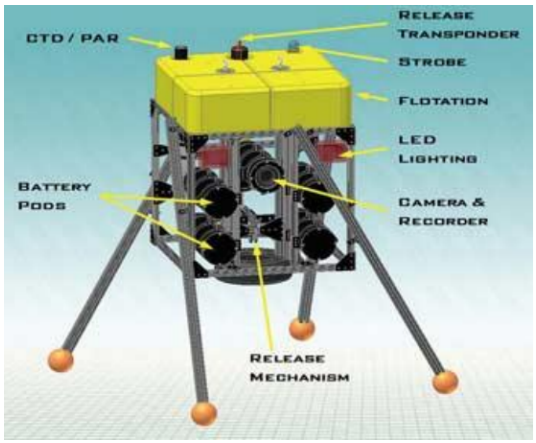



**Figura 2.8:** Lander MEDUSA modular [7]

O sistema *lander* MEDUSA, representado na figura 2.8, é de baixo custo e destina-se a ser mergulhado em profundidades à volta de 2000 metros.

A estrutura incorpora sistemas de vídeo e instrumentação com grande capacidade de suportar cargas, estrutura modular e um sistema de libertação das poitas acionado acusticamente.

#### 2.2.3.2 *Macro open-frame landers*

Os *landers* desta categoria são semelhantes aos anteriores, no entanto são utilizados para operações e missões mais duradouras e com um número mais elevado de equipamento, o que requer um aumento do tamanho do *lander*.

Alguns exemplos de *landers* desta categoria são:

- **DOBO** - *Deep Ocean Benthic Observatory*

Construído no *Aberdeen Ocean Lab*, na Escócia, foi concebido numa estrutura em titânio, capaz de mergulhar a profundidades de 2500 metros durante 10 meses. Possui câmaras de vídeo em modo *time-lapse* e um sistema de libertação de um isco, sendo que liberta pequenas porções deste de forma pré-programada, captando a atenção de peixes e invertebrados que são de seguida fotografados. O *lander* DOBO está representado na figura 2.9:

**Figura 2.9:** *Lander* DOBO de grande profundidade [7] [8]

- **K/MT da KUM Kiel**

A empresa germânica KUM Kiel desenvolveu o lander K/MT, que possui 2 metros de largura e uma estrutura que permite que seja mergulhado até 6000 metros de profundidade, acoplando uma variedade de instrumentos, entre eles uma câmara bêntica onde são executados os testes experimentais.

Trata-se de uma estrutura em tripé, possui poitas, unidade de flutuação bem como diferentes dispositivos de ajuda à localização.

Dependendo da duração das operações, a estrutura pode ser feita em aço inoxidável, plástico reforçado com fibra de vidro ou em titânio. Este último permite reduzir o peso, visto que o titânio é 44% mais leve do que o aço.

O posicionamento e mergulho do K/MT é assegurado pelas poitas que induzem uma flutuabilidade negativa, descendo até ao fundo do mar a uma velocidade entre 0,5 e 1 m/s, onde aterra de forma suave. Depois as poitas são libertadas através de um sistema cronometrado previamente, ou através de um sinal acústico [17].

O K/MT pode ser observado na figura 2.10:

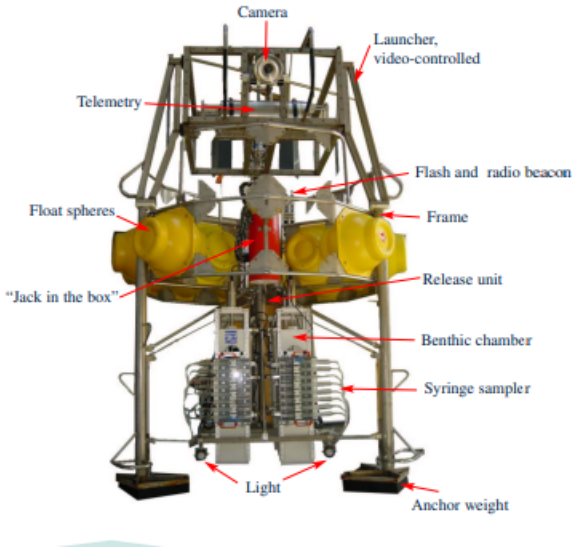



**Figura 2.10:** *Lander* K/MT, da empresa KUM Kiel [8][17]

- **BOBO** - *Benthic Boundary Observatory*

O BOBO é um *lander* de grande profundidade com 4m de altura e foi concebido no *Netherlands Institute of Sea Research.* É capaz de medir temperatura, salinidade, quantidade de partículas na coluna de água, velocidades de corrente e direções de corrente. Estão equipados com câmaras de vídeo e todos os dados recolhidos são armazenados em disco.

Pode ser mergulhado tanto em "queda livre"a partir da superfície do mar, quer acoplado a um cabo para um posicionamento mais preciso e definido. Neste último caso, ele é solto a cerca de 50m do fundo oceânico através de um sinal acústico [7].

- **NOAA**

O NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) utiliza *landers* para efetuar monitorizações de longo prazo e recolha de dados em habitats marinhos. Na figura 2.11 pode observar-se a estrutura triangular em alumínio utilizada para estudar habitats únicos em superfícies de elevado declive (encostas), como canhões, ou mesmo até para o estudo de recifes de coral [7]:

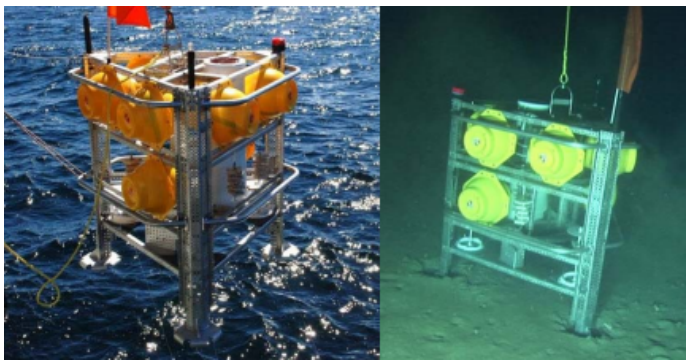


**Figura 2.11:** *Lander* Wilmington da Universidade da Carolina do Norte [7]

- **DELOS**

Com uma estrutura muito similar à do *lander* anteriormente referido, o DELOS (*Deep-Ocean Environmental Long-Term Observatory System*), representado na figura 2.12, apresenta uma forma triangular, sendo que o sistema compreende duas plataformas de monitorização ambiental distintas. Uma situa-se a 5 milhas de qualquer infraestrutura do fundo oceânico e outra a 50 metros de uma nascente no fundo do mar.

Cada plataforma contém duas peças: - a estação de ancoragem que é mergulhada no fundo oceânico no início do programa de monitorização onde permanece durante 25 anos; e um número de módulos observatórios que são concebidos para executar funções de monitorização ambientais específicas. Após mergulhados, cada módulo terá bateria e capacidade de armazenamento suficientes para operação autónoma de pelo menos 6 meses. Ao do fim desses 6 meses, cada plataforma requer a intervenção de um ROV para se recuperar os módulos até à superfície por breves períodos de tempo, de modo a executar manutenções, calibrações e download de dados [18].

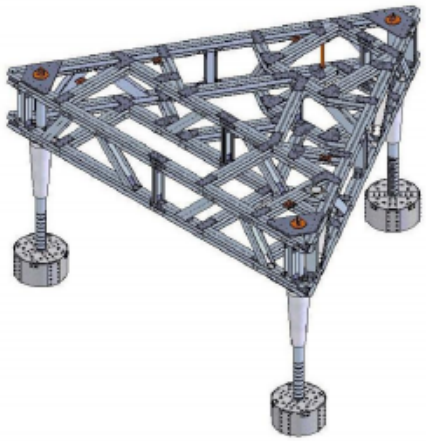


**Figura 2.12:** *Lander* DELOS [18]

#### 2.2.3.3 *Flat shape landers*

Os *landers* discutidos acima utilizam estruturas abertas que geram pouco arrasto horizontal de forma a minimizar os efeitos das correntes oceânicas e permitir que a água flua através dos instrumentos e sensores.

Contudo, existem outros sistemas que utilizam uma forma mais plana (*flat shape*). Devido à existência da camada limite e ao facto dos efeitos induzidos pelas ondas diminuírem exponencialmente com a profundidade, apresentam pouca exposição ao arrasto e utilizam o seu efeito hidrodinâmico para atuar como forças descendentes que ancoram os sistemas com o aumento das correntes no fundo oceânico.

A figura 2.13 apresenta o TWERC, um *lander* em sistema *flat shape*:

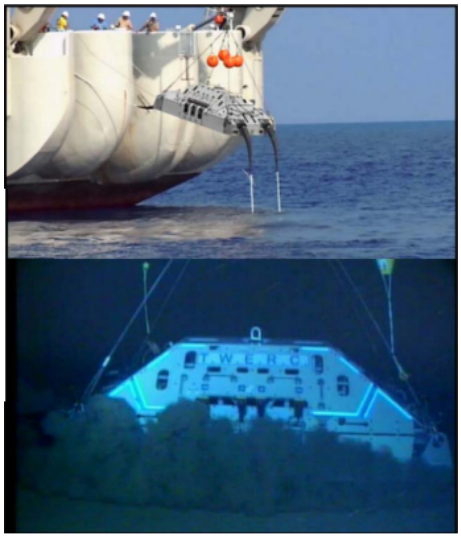


**Figura 2.13:** *Lander* TWERC a ser mergulhado (em cima) e a aterrar no fundo oceânico (em baixo) [7]

Outro exemplo curioso deste tipo de *landers* é o MSM (*Modular subsea monitoring*, apresentado pelo *Kongsberg Maritime*, tendo sido concebido para monitorização contínua do ambiente envolvente, bem como para poder mergulhar em qualquer tipo de operação. Foi criado para atuar como uma ferramenta de alerta para eventos como derrames de óleo ou gás em instalações subaquáticas, gasodutos ou tubos. Na figura 2.14 pode observar-se o MSM:

**Figura 2.14:** *Lander* MSM - *Kongsberg Modular Subsea Monitoring* [7]

### 2.2.4 Materiais aplicados em estruturas e equipamentos submarinos

Os *landers* devem ter uma estrutura de suporte básica onde é montada toda a instrumentação, poitas, mecanismo de libertação e sistema de flutuação. Como seria de esperar, o objetivo principal aquando da conceção e fabrico deste tipo de estruturas é manter o peso tão baixo quanto possível sem comprometer a sua resistência mecânica. Isto permite não só um manejamento mais fácil da instrumentação, como também minimiza a necessidade de

materiais muito caros utilizado para o sistema de flutuação. Os riscos principais para que ocorram danos mecânicos ocorrem durante o lançamento e recuperação do *lander* [15].

Para facilitar o transporte e o armazenamento, particularmente em contentores, a maioria dos construtores concebeu estruturas que são facilmente desmontáveis, sendo que o material mais usado atualmente é o alumínio. Isto deve-se ao facto de apresentar várias vantagens, entre elas o seu custo reduzido e baixa densidade ($\rho$ = 2600 - 2850 kg/$m^3$). Contudo, este metal não apresenta tanta resistência como outros tipos de materiais, e muitos navios não transportam o equipamento especial de soldagem que possa ser necessário para eventuais reparações [15].

Alguns materiais alternativos são o aço inoxidável, titânio, materiais compósitos, como a fibra de vidro reforçada com fibra de aramida (*Kevlar*) com resina epoxy como material de ligação [15], e o polioximetileno (POM) [19].

Se se quiser comparar as densidades entre os diversos materiais que podem ser utilizados, verifica-se que, por exemplo, o titânio, apresenta uma densidade que ronda $\rho$ = 4500 kg/$m^3$. No caso do aço inoxidável, que apresenta aproximadamente um $\rho$ = 7800 kg/$m^3$, ele é cerca de 3 vezes mais denso do que o alumínio e pelo menos 4 vezes mais denso do que materiais compósitos, cuja densidade ronda valores de $\rho$ = 1500 kg/$m^3$. Na verdade, a maior densidade do aço inoxidável acaba pode ser compensada pelas suas boas propriedades mecânicas e anti corrosão. O seu módulo de elasticidade é quase 3 vezes maior do que o do alumínio e cerca de 1,5 vezes maior do que o de materiais compósitos [15].

Na tabela 3 apresentam-se os valores aproximados do módulo de elasticidade, E, de cada material:

**Tabela 3:** Comparação do valor do módulo de elasticidade entre o aço inoxidável, alumínio, compósito, titânio e POM [15][19]

| Material | E (Módulo de Elasticidade) [GPa] |
|---|---|
| Aço Inoxidável | 210 |
| Alumínio | 70 |
| Compósito | 120-140 |
| Titânio | 114-118 |
| POM | 2,8 |

Na realidade, os maiores custos inerentes à construção de *landers* devem-se à mão de obra. Por outro lado, no caso da escolha dos materiais para o *lander* tiver que ser com base nos custos, os preços para o aço inoxidável e para o alumínio são muito semelhantes, ao passo que os dos materiais compósitos e do titânio poderão ser 20 vezes mais caros. O custo dos materiais compósitos pode variar bastante mediante a quantidade de fibras de aramida utilizadas, sendo que a resistência mecânica e o preço aumentam com o aumento da quantidade deste tipo de fibras [15]. Contudo, os materiais compósitos não são usados devido à sua baixa resistência mecânica [19].

Visto que os materiais serão também sujeitos a corrosão na água do mar, então no caso de se escolher alumínio ou aço inoxidável, devem escolher-se as ligas mais resistentes à corrosão, sendo esta uma característica bastante importante a ter em conta [15].

O titânio, apesar de ser leve e resistente, é difícil de soldar e polir, pelo que o processo de polimento deve ser efetuado com as maiores precauções visto que o pó de titânio pode inflamar instantaneamente. Dentro das opções de titânio que se podem escolher, convém evitar as mais frágeis [15].

Uma alternativa menos favorável é o aço galvanizado, apesar de ter propriedades físicas e mecânicas parecidas com as do aço inoxidável. Contudo, tem várias desvantagens, entre elas o facto das secções "fechadas", como por exemplo, tubos cilíndricos, serem difíceis de galvanizar internamente, o que os deixa vulneráveis à corrosão, pelo que qualquer rotura na camada protetora devido a modificações ou danos no equipamento pode induzir o processo de corrosão imediatamente [15].

É bastante aconselhado pelos construtores o uso de ânodos de sacrifício (zinco ou magnésio), que permitem reduzir os problemas devidos à corrosão galvânica [15].

No caso dos materiais escolhidos serem metais, e independentemente de quais sejam escolhidos, deve ter-se um cuidado especial quando combinados diferentes metais, pois qualquer falha a isolar diferentes metais uns dos outros, através de revestimentos ou pinturas, pode também resultar numa rápida corrosão do metal com menor poder redutivo [15].

Como referido anteriormente, um material que pode também ser utilizado é o polioximetileno (POM), um termoplástico de alto desempenho, cujas características, como o seu baixo preço e baixa densidade, tornam-no numa boa alternativa ao alumínio [19].

Na tabela 4 pode-se observar uma comparação entre as propriedades do POM e do aço inoxidável, alumínio e titânio:

**Tabela 4:** Propriedades de materiais comuns no projeto de *landers* [15][19].

| Material | Densidade ($kg/m^3$) | Tensão Limite de Elasticidade [MPa] | Resistência à corrosão |
|---|---|---|---|
| Aço inoxidável | 7800 | 350 | Razoável |
| Alumínio | 2700 | 36 | Razoável |
| Titânio | 4500 | 140 | Muito boa |
| POM | 1400 | 43 | Muito boa |

#### 2.2.4.1 Materiais dos compartimentos

A maior parte dos componentes e dispositivos incorporados nos *landers*, como sensores, baterias ou componentes eletrónicos, são concebidos para funcionar a pressões de 1 atm, o que significa que os compartimentos onde serão colocados estes componentes devem ter resistência suficiente pois podem ser expostos a altas pressões diferenciais (entre 1 atm no interior e a pressão hidrostática no exterior).

Assim, a seleção destes materiais para os compartimentos torna-se também crítica visto que os mesmos determinam o peso e tamanho do *lander* [9].

Na tabela 5 pode-se comparar as propriedades de alguns materiais comummente usados para construir os compartimentos de pressão:

**Tabela 5:** Materiais tipicamente utilizados para compartimentos de pressão [9]

| Propriedade | Liga de Aço | Liga de Alumínio | Liga de Titânio | Compósito C | Cerâmico |
|---|---|---|---|---|---|
| Resistência à tração (MPa) | 400 | 500 | 900 | 2000 | 700 |
| Densidade (kg/$m^3$) | 7800 | 2700 | 4400 | 1500 | 3600 |
| Fabrico | Excelente | Muito boa | Boa | Razoável | Razoável |
| Resistência à corrosão | Razoável | Razoável | Muito boa | Excelente | Excelente |
| Suscetibilidade magnética | Muito alta | Média | Alta | Muito baixa | Muito baixa |
| Custo relativo | Muito baixa | Muito baixa | Alta | Muito baixa | Moderado |

Do mesmo modo como foi referido anteriormente para a estrutura do *lander*, mesmo que a escolha recaia sobre uma liga de alumínio ou de titânio, que possuem razoável e muito boa resistência à corrosão galvânica, respetivamente, devem ser do mesmo modo utilizados ânodos de sacrifício, como o zinco, para revestir os materiais dos compartimentos

de pressão, visto que estes ânodos de sacrifício são mais ativos galvanicamente, pelo que corroem preferencialmente antes do material do compartimento. O mesmo se aplica ao aço inoxidável, que apresenta a menor resistência à corrosão de entre os cinco materiais comparados [9].

### 2.2.5 Sistemas de variação de flutuabilidade utilizados

Os sistemas de variação de flutuabilidade utilizados atualmente podem ser estáticos ou ativos. Caso o sistema seja estático, devem ser realizados ajustes do lastro do veículo antes do mergulho, que podem ser feitos adicionando ou removendo pesos ou sistemas flutuantes, como espumas de flutuação. Já no caso do ajuste ser ativo, esta tarefa pode ser executada durante a imersão, pelo que o *lander* deverá utilizar dispositivos de variação de massa ou volume, borrachas de dimensão variável ou outros tipos de materiais [20].

No que toca aos ajustes de lastro ativos, eles podem ser realizados, por exemplo, através dos seguintes métodos:

- Reservatórios com óleo: incorpora-se no exterior do *lander* borrachas flexíveis. Assim, quando o óleo do reservatório é bombeado para as borrachas, elas expandem, aumentando o volume e, consequentemente, a flutuabilidade do *lander*. O processo inverso pode ser efetuado também. O óleo é bombeado para dentro do reservatório, diminuindo o volume e a flutuabilidade;

- Tanque de variação de flutuabilidade: tanques rígidos resistentes à pressão, que podem ser incorporados no veículo. Estes podem ser cheios ou esvaziados de água com recurso a uma bomba de pressão;

- Tanques de lastro variável: tanques feitos em material que permite variar o seu volume. Injeta-se ar pressurizado para dentro do tanque caso se queira ter flutuabilidade positiva. No entanto, este método não é muito seguro para grandes profundidades, pelo facto de a quantidade de ar pressurizado necessária ser muito elevada. Existe também uma variante destes tanques, em que se injeta água juntamente com o ar, para alcançar os mesmos objetivos;

- Adição de pesos (poitas): o *lander* é equipado com peso adicional, como poitas, o que o torna negativo em termos de flutuabilidade para efetuar o mergulho. Para regressar à superfície, os pesos são removidos, de forma a tornar a flutuabilidade positiva [20]. Vários materiais podem ser utilizados para os pesos, como betão, ferro ou chumbo. O

chumbo possui a maior densidade, no entanto deve ser evitado visto que pode causar impacto ambiental. Ferro é barato e fácil de utilizar, e se fundidos em forma cónica podem minimizar as perturbações durante a aterragem. Contudo, o ferro requer que seja efetuado um processo de fundição, que também acarreta custos, logo deve ser tido em conta pois poderá ficar mais caro do que os outros materiais. Já o betão apresenta baixa densidade. Uma vantagem do uso de poitas é o facto de a sucção efetuada pelos sedimentos ser feita maioritariamente nelas, ou seja, são as poitas que ficam enterradas nos sedimentos, pelo que a libertação das mesmas permite que a estrutura se solte. [15]

#### 2.2.5.1 Descida e aterragem

As correntes oceânicas na coluna de água afetam o *lander* durante a descida e subida, pelo que o podem afastar da posição pretendida. Quanto mais rápido o *lander* descer ou subir, menos se afastará da sua posição. Outro fator que cria a necessidade de aumentar a velocidade de subida e descida prende-se com os tempos de espera. Por outro lado, se a velocidade de descida for muito alta, pode causar perturbações excessivas na interface sedimento-água no local de estudo, podendo até ficar enterrado nos sedimentos, sem poder ser recuperado [15].

A descida de um *lander* dentro da água é afetada por vários fatores, entre eles a gravidade, o princípio de Arquimedes e a força de arrasto. A força de arrasto acaba por resultar não apenas da fricção entre a água e a estrutura, mas também na água que se move juntamente com o *lander*, a que se chamada "massa adicionada".

A seguinte expressão permite calcular a velocidade limite para um corpo irregular em "queda-livre"dentro de água:

$$V_{limite} = \sqrt{\frac{2 * m_{água} * g}{\rho_{líquido} * C_d * S}} \tag{1}$$

Sendo:

- $m_{água}$: massa do *lander* dentro da água;
- g: constante gravitacional (g=9.81m/s);
- $\rho_{líquido}$: massa volúmica da água;
- $C_d$: coeficiente de arrasto (depende do número de Reynolds e da forma da estrutura);

- S: área projetada.

Pela expressão (1), pode concluir-se que, caso se pretenda aumentar a velocidade de descida (que pode ser útil caso seja necessário diminuir tanto o tempo de descida como o tempo de operação), a área projetada na direção do mergulho deve ser diminuída. Caso a área projetada não possa ser reduzida, a alternativa poderia passar por aumentar o peso das poitas. Contudo, quanto maior a velocidade maior será a força de impacto da estrutura no fundo do mar, o que pode danificar a mesma. Assim, deve ser encontrado um equilíbrio de maneira a não comprometer a integridade da estrutura.

## 2.3 MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL E PREVENÇÃO DE DANOS NOS *landers*

Dependendo dos materiais utilizados na construção dos *landers* e o facto de as suas geometrias poderem ser mais ou menos complexas geram dificuldades no projeto e nos requisitos de segurança, pelo que é necessário um grande investimento na investigação do desempenho subaquático deste tipo de estruturas e na caracterização dos seus materiais, de modo a que sejam otimizadas e que se evitem problemas ou danos após serem submergidas [9].

A monitorização constante e uma manutenção adequada deste tipo de estruturas é um requisito fundamental para manter o seu funcionamento.

Apesar de existirem métodos avançados de análise e projeto de sistemas estruturais que diminuem a probabilidade de ocorrerem falhas ou danos, na prática podem ocorrer alguns desafios e problemas ao nível da construção, de que resultam desvios em relação à solução projetada, o que causa incertezas e algumas dificuldades na sua utilização. Para além disso, o envelhecimento das estruturas e o seu desgaste colocam desafios adicionais inerentes à sua degradação.

Os avanços na monitorização de estruturas, SHM (*Structural Health Monitoring*), ajudam na determinação de potenciais riscos nas mesmas causados pelo envelhecimento, bem como por fatores ambientais imprevistos. Isto é feito através de uma examinação da condição atual dos sistemas estruturais, de maneira a avaliar os seus níveis de desempenho e funcionalidade. Caso seja determinado que o nível de desempenho é baixo quando comparado aos realmente pretendidos, devem ser iniciados procedimentos de reparação imediata, sendo de salientar que os procedimentos de reparação estrutural são executados apenas após a estrutura ter sofrido danos consideráveis. Contudo, visto que o caso dos *landers* é

de importância estratégica, tais práticas não são aceitáveis, pelo que se devem planear e agendar manutenções preventivas. Sendo a monitorização estrutural, SHM, uma ferramenta fundamental em termos de segurança na engenharia, poderá ser utilizada também para obter uma redução de custos tanto a curto como a longo prazo no que toca à manutenção e reparação destas estruturas.

Existem três importantes fases no SHM que se devem ter em conta, sendo elas a avaliação estrutural, monitorização e controlo.

A avaliação estrutural deve ter em conta as condições atuais e a capacidade de resistir às cargas atuantes em serviço, sendo que o diagnóstico é também muito importante, visto que envolve a integração de vários sensores utilizados nas medições, poder computacional e capacidade de processar a informação para obter resultados eficazes. A monitorização deve ser feita de forma contínua utilizando sensores e dispositivos eletrónicos. Estes procedimentos devem ser efetuados ao longo do tempo de maneira a manter a utilidade funcional da estrutura, pelo que as manutenções podem ser tanto periódicas como de prevenção. Já o controlo lida com a resposta ao comportamento dinâmico das estruturas quando submetidas a várias cargas pelo o ambiente que as rodeia. É assim importante que se estabeleçam mecanismos de controlo de forma a verificar que as respostas estejam abaixo dos limites preferíveis mesmo com aumentos imprevisíveis das magnitudes das cargas [21].

### 2.3.1 Fases da monitorização estrutural

Assim, estas 3 fases referidas acima podem ser priorizadas da seguinte forma:

- Avaliação, na qual são preparadas as condições que vão atuar na estrutura em termos da geometria e da capacidade de suportar cargas atuantes, pelo que lida com a examinação dessas mesmas condições das quais se pode tirar vantagem para além da vida do projeto original;

- Monitorização, mais relacionada com a manutenção. O objetivo é perceber o estado atual e disponibilidade da estrutura em causa. No entanto, não se trata necessariamente de saber o estado da estrutura em tempo real, visto que as manutenções podem ser adiadas devido ao facto de haver uma margem de segurança aquando do projeto da estrutura. Assim, a monitorização permite um planeamento eficaz dos procedimentos de manutenção;

- Controlo, que visa eliminar ou reduzir respostas não desejadas mesmo sob aumentos imprevisíveis das magnitudes de carga atuantes. Podem existir deslocamentos

excessivos nos graus de liberdade, que se tornam indesejáveis para a estabilidade hidrodinâmica. Consequentemente, é importante assegurar a segurança estrutural e segurança de operação através do controlo dos deslocamentos, tanto rotacionais como de translação.

Contudo, a priorização descrita acima não é linear e pode depender de vários fatores, como o tipo de estrutura ou fatores económicos.

De notar que, fazendo uma analogia com a monitorização de saúde de um humano, uma pessoa que vá fazer um exame médico é referida como um indivíduo e não como um paciente, visto que este pode não estar doente. Este processo é chamado de "diagnóstico"em termos médicos, ao passo que no caso da monitorização estrutural é chamado de "monitorização".

A monitorização das respostas (*outputs*) pode permitir a avaliação da condição da estrutura e chegar a uma conclusão relativamente ao estado atual da mesma. Fazendo a mesma analogia, a fase da avaliação pode ser comparada ao relatório pós-diagnóstico de uma pessoa, que clarifica o estado de saúde da mesma e permite perceber se é ou não necessário apoio médico, ao passo que na monitorização estrutural a avaliação possibilita perceber quais as recomendações de controlo devem ser feitas de modo a reduzir ou eliminar as respostas indesejáveis da estrutura. A isto chama-se de controlo, que baseado no diagnóstico e avaliação, visa mitigar o problema.

No fundo, a monitorização estrutural engloba alguns passos de maior interesse, como por exemplo:

- Identificação da estrutura que necessita monitorização;
- Aquisição de informação acerca da degradação ou não dos materiais que compõem a estrutura projetada;
- Estabelecimento de respostas do sistema para estas possíveis degradações;
- Projeção de um sistema de monitorização estrutural adequado, que possa detetar essas condições através da incorporação de uma rede de sensores;
- Instalação e calibração da rede de sensores;
- Aquisição, análise e gestão de dados;
- Agendamento de um plano de emergência em caso de problemas.

A monitorização estrutural pode envolver manutenções constantes ao longo do tempo, que é muito importante para a avaliação da condição da estrutura. Neste caso, o processo de manutenção deve ser realizado em intervalos de tempo específicos, independentemente do estado atual da estrutura [21].

### 2.3.2 Vantagens da monitorização estrutural

A monitorização estrutural apresenta várias vantagens. Contudo, existem também alguns desafios, como por exemplo atingir a configuração ótima dos sensores utilizados em termos da escolha, tipo, disposição e número, bem como em termos dos sistemas de comunicação.

De entre as vantagens, podem salientar-se as seguintes:

- Permite atualizar a integridade da estrutura, caso a monitorização seja feita regularmente;
- O valor útil e funcional da estrutura é melhorado, podendo ser otimizada;
- Minimiza o tempo de inatividade;
- Permite executar manutenções periódicas com foco a nível da sua performance;
- Poupança ao nível do investimento no trabalho de manutenção. Visto que o trabalho de inspeção é caro, muito especializado e demorado, estes problemas podem ser minimizados através de uma manutenção regular;
- Redução do envolvimento humano em termos de inspeção, planeamento e tomada de decisões em relação às manutenções, reduzindo assim custos de mão-de-obra;
- Permite que se evite manutenções desnecessárias em estruturas que estão em bom estado. [21]

### 2.3.3 Componentes da monitorização estrutural

A figura 2.15 permite ter uma ideia dos componentes envolvidos na monitorização estrutural:

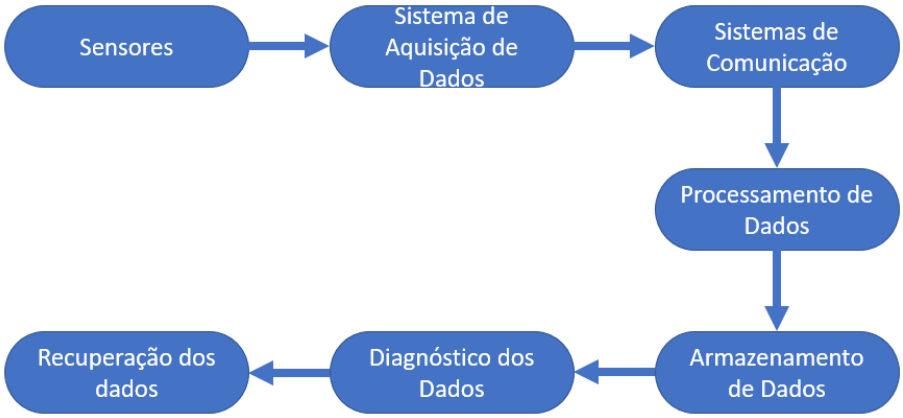



**Figura 2.15:** Componentes da monitorização estrutural [21]

Como se pode observar na figura, vários sensores incorporados na estrutura devem estar ligados a um sistema de aquisição de dados que, através de um sistema de comunicação, permite transferi-los para uma unidade de processamento. Após o seu pós-processamento, os dados são armazenados. A utilização desta informação permite posteriormente diagnosticar problemas e emitir alertas sempre que são atingidas situações de risco para a estrutura.

O esquema representado na figura inclui os vários componentes envolvidos na completa monitorização estrutural utilizada em engenharia.

Assim sendo, os componentes vitais são:

- Sensores: Existem variados tipos de sensores que podem ser utilizados;
- Aquisição de dados: Depende do sistema de sensorização utilizado, que pode ser *wireless* ou por cabo;
- Sistema de comunicação;
- Processamento de dados: Lida com verificação da qualidade e a análise estatística dos dados recolhidos;
- Armazenamento de dados: Requer também diagnóstico e recuperação dos mesmos. [21]

### 2.3.4 Sensores utilizados na monitorização estrutural

Alguns dos sensores mais comummente utilizados para monitorização estrutural em engenharia são os seguintes:

- Fibras óticas - Redes de Bragg (*Fibre Bragg diffraction grating sensors*):

  As redes de difração de *Bragg* são inseridas dentro das chamadas fibras *single-mode*. Estas fibras contêm um núcleo com diâmetros entre 4 e 9 $\mu$m e uma parte exterior de vidro puro ($SiO_2$) que envolve o núcleo, com cerca de 125 $\mu$m de diâmetro. O núcleo apresenta um índice de refração mais elevado, pelo que esta diferença nos índices de refração entre o núcleo e a parte exterior faz com que a luz se propague apenas no núcleo. De maneira a proteger a fibra, ela é geralmente revestida com acrilato, poliimida ou mesmo ORMOCER (*organic modulated ceramic*) [22].

  De modo a inserir as redes de *Bragg* no núcleo da fibra, deve-se primeiramente remover o revestimento da fibra e voltar a revesti-la após inserção das redes. Este processo deve ser realizado de forma muito minuciosa, já que a estabilidade mecânica das fibras pode ser comprometida, o que poderá fazer com que parta mesmo a níveis baixos de deformação [22].

  Assim, as redes de *Bragg* são sensores que podem ser incorporados nas estruturas e medem os deslocamentos causados pelas deformações. Quando se alonga os sensores de rede de *Bragg*, o período espacial da mesma sofre alterações, o que causa uma mudança no comprimento de onda da luz ultravioleta refletida [22]. Este tipo de sensores transmite um diferente comprimento de onda dependendo da deformação detetada e mede as deformações axiais que podem resultar de tensões que podem ser de tração ou compressão [21].

  A figura 2.16 apresenta uma esquematização das redes de *Bragg*, fazendo menção à variação do período espacial causado pela alongação da fibra, o que causa consequentemente uma alteração no comprimento de onda da luz refletida:

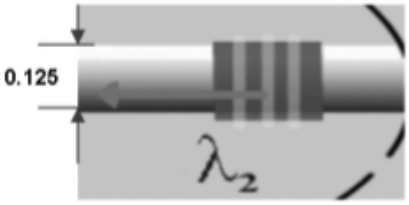



**Figura 2.16:** Redes de *Bragg* [22].

- Sensores de emissão acústica:

  Funcionam com base na emissão de sinais acústicos, gerados pela presença de fraturas ou falhas locais. Podem ser úteis na medição de delaminação das fibras ou ruturas [21];

Na verdade, a emissão acústica é um fenómeno de ocorrência natural nos materiais, sendo que este termo é usado para definir as ondas elásticas transientes, que são o resultado de uma libertação de energia repentina devido a deformações ocorridas nos materiais, que resultam de mudanças microestruturais. Se for libertada energia suficiente, são produzidos sons audíveis. A propagação de falhas ou movimentos de deslocação são alguns exemplos de sons que poderão ser audíveis [23].

Pode-se também fazer uma distinção entre dois tipos de emissão acústica, que são a emissão contínua e a emissão em rajada. Durante a emissão contínua, caracterizada por possuir muito baixa energia, a amplitude da emissão aumenta com o aumento da carga, pelo que este tipo de emissão pode estar relacionado, por exemplo, com movimentos de deslocação em metais. Já a emissão em rajada caracteriza-se por possuir uma amplitude e energia muito maiores, pelo que ocorre quando operam fontes de maior energia, sendo a propagação de falhas um exemplo da mesma [23].

A utilização de sensores de emissão acústica apresenta a vantagem de, durante monitorização contínua, podem ser detetadas ocorrências imediatamente e em qualquer parte da estrutura. Contudo, existe a desvantagem de ser necessário um operador com capacidade suficiente para interpretar a informação e a relacionar com possíveis problemas [22].

Uma configuração simples de instrumentação com emissão acústica inclui um sensor incorporado na estrutura através de uma conexão, um pré-amplificador, um filtro e uma unidade de análise de sinal. Aquando da ocorrência de uma falha ou deslocamento, as ondas elásticas geradas propagam-se através do material ou outros meios possíveis (por exemplo o meio de conexão entre o sensor e a estrutura), até ao sensor. O sensor depois faz a conversão para sinal elétrico [22].

Na figura 2.17 pode observar-se uma configuração com utilização de um sensor de emissão acústica, fazendo referência aos diversos trajetos que as ondas geradas podem ter até chegar ao sensor, que podem ser diretos ou refletidos uma ou várias vezes:

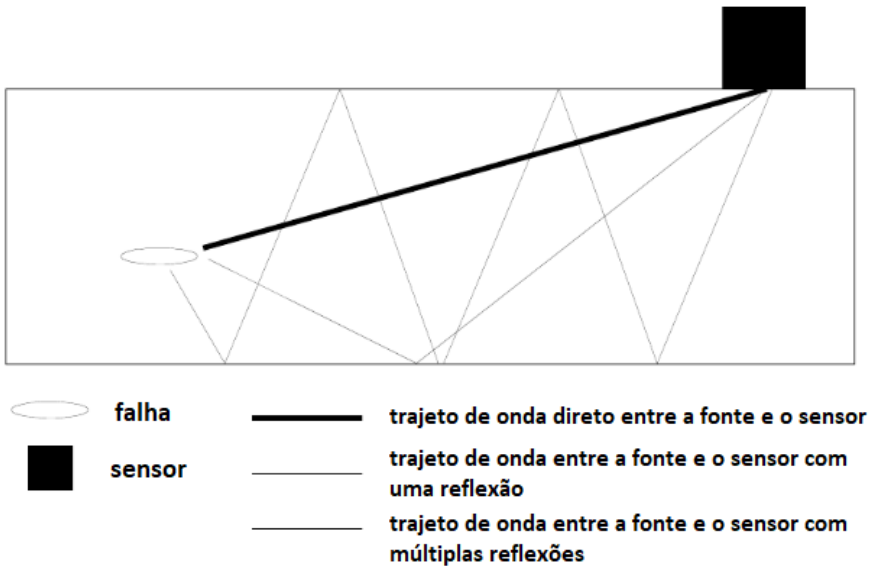



**Figura 2.17:** Configuração com utilização de sensor de emissão acústica [23].

- Revestimentos: Através de pinturas ou revestimentos aplicados na superfície, que ficam integradas nos elementos piezoelétricos e ferroelétricos, permitem medir a variação na deformação;
- Sensores microondas: Úteis para indicar entrada de humidade na estrutura e são eficientes para materiais compósitos;
- Sensores ultrasónicos: Visto que incorporam um transdutor ultrassónico, geram um sinal que se propaga através do material, sendo que a presença de falhas ou danos encontram-se quando existe uma mudança na reflexão. [21]

### 2.3.5 Obtenção dos dados

Quando um *lander* é submerso no fundo do mar, o sistema de monitorização estrutural monitoriza constantemente a estrutura, pelo que deve existir uma forma de obter os dados lidos pela sensorização, para que se possa analisar e tomar as devidas precauções, caso necessário.

Isto pode ser feito através da emissão de sinais acústicos [7] para avisar sobre a ocorrência de situações anormais que ocorram na estrutura, o que permite aos operadores detetar qualquer problema, sendo que a obtenção dos dados poderia ser efetuada através da utilização de um ROV, veículo operado remotamente, de forma a recuperar os módulos à superfície para fazer *download* de dados [18].

Na realidade, a comunicação via *wireless* é difícil debaixo de água, visto que as ondas eletromagnéticas se atenuam muito rapidamente, o que faz com que em muitos casos sejam inúteis para a comunicação. Contudo, são trasmitidas razoavelmente bem a curtas distâncias, ou seja, para profundidades baixas. Existem algumas formas que são tipicamente utilizadas para comunicar com AUVs dentro de água, como por exemplo o uso de *Gliders*, que são AUVs de pequena dimensão que utilizam variações de flutuabilidade e temperatura da água, em conjunto com as suas asas, para converter movimentos verticais em horizontais. Os *Gliders* podem ser colocados em serviço durante longas missões e podem retornar à superfície periodicamente de forma a comunicar com os servidores via satélite de forma a reportar atualizações e fazer *download* de dados [9]. Assim, visto que os *Gliders* são utilizados para comunicar com AUVs, podem igualmente ser utilizados para comunicar com *landers*.

Como referido anteriormente, uma solução fiável para comunicação subaquática profunda prende-se com a utilização de ondas acústicas. Devido a alguns avanços recentes na tecnologia, existem alguns *modems* que podem ser utilizados, entre eles o *micro-modem* WHOI, desenvolvido pelo grupo de comunicações acústicas do *Woods Hole Oceanographic Institution*, ou então os *modems* acústicos desenvolvidos pela *Link Quest* [9].

Já para profundidades baixas, existem alguns métodos de comunicação via *wireless*, que adaptados com pequenas modificações para atender a estas aplicações subaquáticas, podem ser utilizados para transmitir dados [9].

### 2.3.6 Comparação da fiabilidade com e sem uso de monitorização estrutural

Para melhor perceber a utilidade da monitorização estrutural, podem comparar-se duas operações, uma em que se utiliza um sistema de monitorização estrutural e outra em que não é utilizado. Sendo assim, a qualidade da estrutura em termos do seu valor funcional pode ser dada tanto pelos custos de manutenção, como pelo nível de fiabilidade.

No caso de não ser usado nenhum sistema de monitorização estrutural, a fiabilidade do sistema é alta no início, contudo, decresce ao longo to tempo, o que indica que a fiabilidade de estruturas sem este tipo de sistemas diminui ao longo do tempo e os custos de manutenção aumentam.

Por outro lado, o uso de sistemas de monitorização estrutural permite manter um custo de manutenção baixo e constante ao longo do tempo, bem como uma fiabilidade alta e constante também.

Na figura 2.18 apresenta-se um gráfico que permite melhor compreender esta compara-

ção: [21]

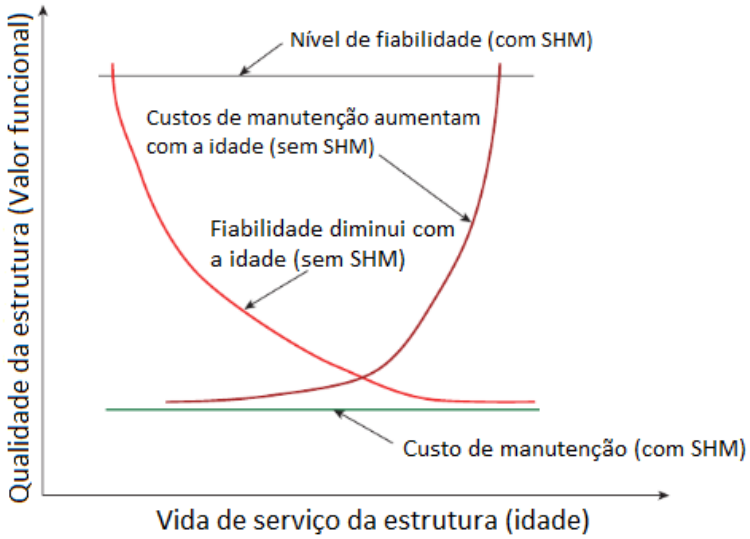



**Figura 2.18:** Comparação de estruturas com e sem uso de sistemas de monitorização estrutural, SHM [21]

# Capítulo 3

# Caso de Estudo

## 3.1 LANDER AMALIA E O SEU OBJETIVO

Como referido anteriormente, o caso em estudo nesta dissertação trata-se de um *lander* projetado, concebido e fabricado pelo INEGI no ano de 2018, sendo esse projeto designado por AMALIA - "Algae-to-Market Lab IdeAs".

O projeto surgiu da intenção de controlar o surgimento de algas invasivas exóticas e a sua colonização de ambientes subaquáticos, que está a causar muitos problemas ecológicos por todo o mundo [19]. Na realidade, estas algas, ao invadirem tais ambientes, obrigam as espécies nativas a mudarem o seu habitat, o que causa a perda do seu genótipo e afeta não só os habitats marinhos no geral, como também os processos dentro dos ecossistemas e as propriedades das cadeias alimentares [24].

Assim, o projeto AMALIA visa transformar esta ameaça aos oceanos numa oportunidade de atribuír valor económico a estas algas presentes no nordeste da Península Ibérica [19].

Deste modo, foi desenvolvido o *lander*, que é constituído por uma estrutura modular submergível que incorpora o equipamento e a instrumentação necessários à monitorização do aparecimento e desenvolvimento das algas.

Na figura 3.1 pode observar-se o *lander* em questão:

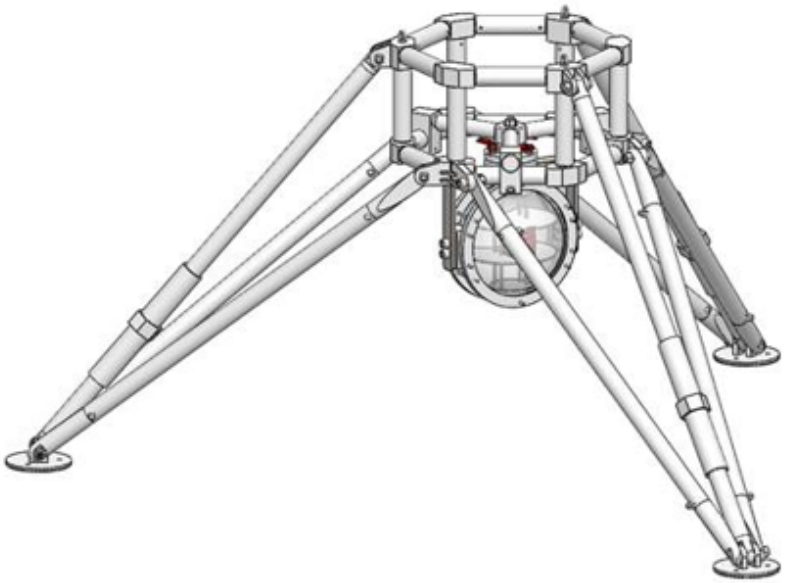


**Figura 3.1:** *Lander* AMALIA [25]

## 3.2 HISTÓRICO DO AMALIA

Durante o projeto do *lander* AMALIA estiveram envolvidas várias entidades, entre elas o INEGI e o Eng.º Hugo Alves [8].

O Eng.º Hugo Alves desenvolveu a sua tese de mestrado baseada no projeto do *lander* AMALIA, na qual descreveu o procedimento para a escolha da geometria do sistema, dos materiais de construção para os diferentes componentes e estudou o comportamento da estrutura quando sujeita a diferentes cargas [8].

Uma vez que se trata de uma estrutura muito complexa e inovadora, ela deve ser constantemente monitorizada e mantida. Assim, pode-se manter um equilíbrio ao longo do tempo entre o nível de custos devidos à manutenção e ao nível de fiabilidade do estado do *lander*. É por isso fundamental a utilização de um sistema de monitorização estrutural na mesma. A conceção do sistema de monitorização levou à necessidade de executar tanto ensaios laboratoriais, como a criação de um modelo numérico e execução de simulações, de maneira a estudar o comportamento da estrutura e garantir que o sistema de monitorização é confiável, como está detalhado nos capítulos 4 e 5, respetivamente.

Na realidade, logo desde o início do projeto do *lander* AMALIA, foi uma ideia de todas as partes envolvidas que se concebesse um sistema de monitorização estrutural para o mesmo, para que se pudesse ter mais informação após a instalação no fundo do mar, pelo que sempre foi intenção poder ter dados experimentais para se poder alimentar um modelo numérico, que permitisse fazer tanto avaliação experimental, como numérica, e para que os dados obtidos pudessem ser aplicados na monitorização em tempo real da estrutura, entre outras aplicações.

## 3.3 CARACTERÍSTICAS DO AMALIA

### 3.3.1 Dimensões do AMALIA

O *lander* possui uma estrutura modular e de geometria variável que lhe permite alterar a orientação das pernas/apoios para a sua colocação nivelada em terrenos irregulares, pelo que as suas dimensões variam consoante o ajuste da estrutura.

Como o ângulo de orientação das pernas pode variar entre 25º e 40º, a altura total do *lander* pode variar entre os 1626mm e os 2036mm, ao passo que o seu diâmetro de base varia entre 2572mm e 3829mm.

Nas figuras 3.2 e 3.3, apresenta-se uma representação esquemática com as dimensões do AMALIA, consoante a posição das pernas:

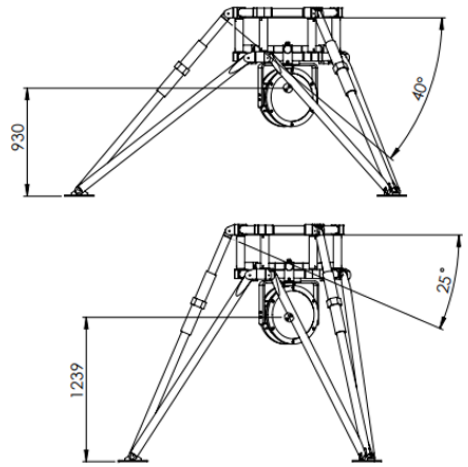



**Figura 3.2:** Ângulo das pernas do AMALIA e altura do centro de gravidade em função das mesmas [26]

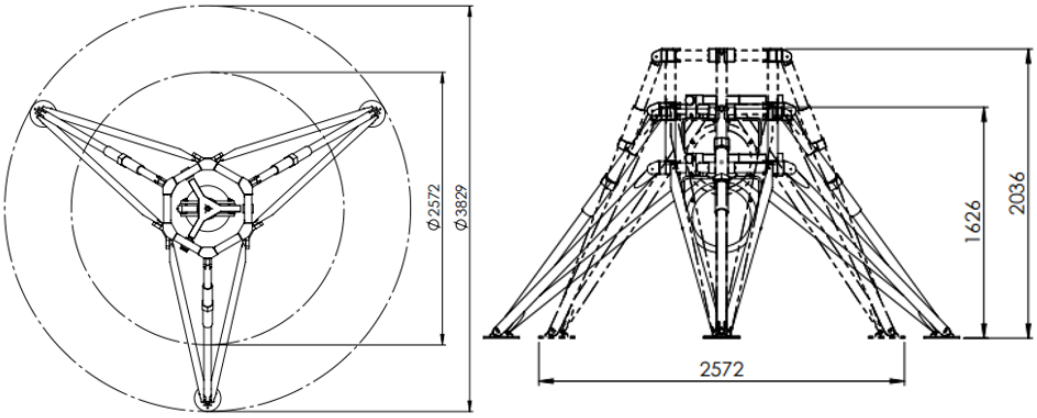
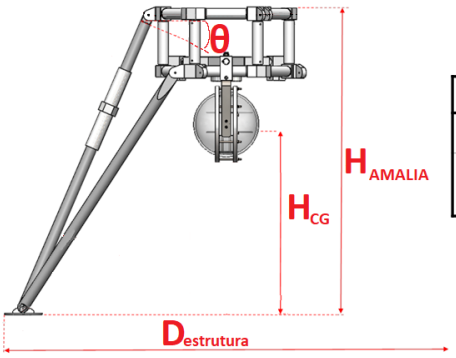



**Figura 3.3:** Dimensões gerais do AMALIA em função do ângulo das pernas [27]

A figura 3.4 vem acompanhada de uma tabela, que permite melhor compreender as dimensões da estrutura em função do ângulo de inclinação das pernas, representado por $\theta$:




| Ângulo ϴ | Hamalia [mm] | Destrutura [mm] | Hcg [mm] |
|---|---|---|---|
| 25° | 2036 | 2572 | 1239 |
| 40° | 1626 | 3829 | 930 |

**Figura 3.4:** Altura, diâmetro e altura do centro de gravidade do AMALIA em função do ângulo das pernas, $\theta$ [28]

## 3.4 MATERIAL DO AMALIA

Como referido no Capítulo 2, um dos objetivos do projeto a minimização do peso final do *lander*, bem como a utilização de materiais com baixo custo por forma a minimizar o custo final do dispositivo.

Durante o projeto do *lander*, foram consideradas duas opções para o material do módulo central: o POM (POLYACETAL [POM-C] - Ertacetal C) e o alumínio. Foi estimado que o custo do POM seria ligeiramente mais caro do que o do alumínio. Contudo, este preço foi estimado apenas para a matéria-prima, pelo que não se considerou os custos de maquinagem, soldadura e revestimento anti-corrosivo, estes últimos dois referentes ao alumínio, pelo que o custo final do POM seria menor, visto que a maquinagem deste copolímero é fácil e barata. Assim sendo, foi este o material escolhido para o módulo central, o POM [8].

De igual modo, foi decidido que o material mais indicado para a estrutura seria também o POM. Neste caso, os três materiais considerados no projeto foram o aço inoxidável, o POM e o alumínio. Sendo o POM um polímero de alta performance, o facto de ser leve e barato tornaram-no num material mais adequado aos objetivos do projeto. O aço inoxidável é também barato e possui boas propriedades mecânicas, mas é bastante mais pesado. Quanto ao alumínio, uma estrutura feita neste material iria requerer algum cuidado na seleção da liga e dos tratamentos superficiais que minimizassem os problemas de corrosão.

Por todos estes motivos, o material utilizado na construção do *lander* foi o POM [8].

### 3.4.1 Características do POM

O POM é um polímero semi-cristalino, sendo o nome comercial designado por ERTACETAL C. A sua estabilidade dimensional é maior do que a das poliamidas, apesar de possuir uma menor resistência ao desgaste do que estas.

Sendo um polímero, apresenta algumas características que o recomendam para a aplicação pretendida, das quais se podem salientar:

- Alta resistência mecânica, rigidez e dureza;
- Elevada resistência ao impacto;
- Excelente estabilidade dimensional;
- Razoável resistência ao desgaste por abrasão;
- Fácil maquinagem;
- Baixa absorção de humidade.

De entre as suas propriedades, pode mencionar-se a sua massa volúmica, aproximadamente $\rho$ = 1400 $kg/m^3$ e o seu Módulo de Elasticidade, E = 2,8 GPa [8].

## 3.5 MODELO À ESCALA 1:9

Após efetuados todos os cálculos necessários, ficou definido que a escala geométrica do modelo físico teria que ser 1:9. Esta escala foi definida tendo em conta as dimensões e capacidades do canal de ondas e correntes onde o modelo veio a ser testado posteriormente. O modelo à escala 1:9 era o maior possível de ser testado dentro do canal sem gerar problemas de efeitos das paredes do canal, pelo que foi a escala escolhida de maneira a poderem ser simuladas as condições reais no canal de ondas e correntes com a maior precisão possível.

O modelo à escala pode ser observado na figura 3.5:

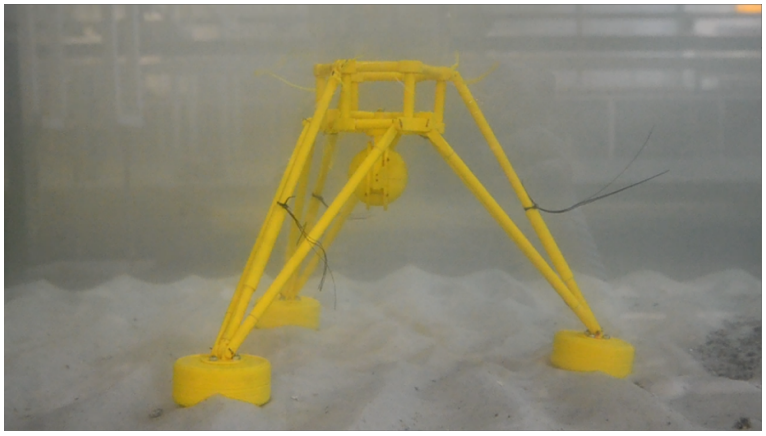


**Figura 3.5:** Modelo à escala 1:9 do *lander* no canal de ondas e correntes da FEUP

O modelo foi fabricado de acordo com os desenhos em CAD e com recurso a uma impressora 3D.

# Capítulo 4

# Ensaios Experimentais

Após conclusão dos ajustes no *lander* à escala geométrica 1:9, foi preparado o arranque dos testes no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP.

Os ensaios foram realizados num canal de ondas, com cerca de 1m de altura, pelo que ficou definido que a altura de água à escala ideal seria de 0,7m. A razão para tal prende-se com o facto de se ter considerado a colocação do *lander* em águas pouco profundas, a cerca de 10 metros de profundidade, onde tanto as ondas como as correntes são solicitações importantes.

Os ensaios experimentais foram precedidos pela definição da matriz de ensaios.

## 4.1 INSTRUMENTAÇÃO NECESSÁRIA

Para que se pudessem efetuar todos os ensaios necessários, bem como adquirir todos os dados para uma análise posterior, foram necessários vários equipamentos:

- Canal de ondas;
- Válvula reguladora de caudal - Para se ter a velocidade da corrente pretendida;
- Batedor/gerador de ondas;
- Software de input de dados;
- Software de output/aquisição de dados;
- Sondas de níveis hidrodinâmicos;
- Sonda de velocidade;
- Câmara de vídeo.

De notar que tanto o gerador de ondas como o software de input e de aquisição de dados foi criado pela empresa HR Wallingford.

## 4.2 VERIFICAÇÕES NO CANAL DE ONDAS E CORRENTES

Primeiramente foi efetuado um teste de visibilidade, de modo a verificar se após colocada a estrutura dentro do canal com água em movimento se podia ver claramente o

protótipo através do vidro, se a câmara iria poder captar todas as imagens da estrutura e se a corrente de água era bem visível.

Para isso, submergiu-se uma pequena peça da estrutura, juntamente com outro objeto flexível, que ajudou a perceber se se conseguiam observar os movimentos do mesmo com a corrente, como se pode observar na figura 4.1:

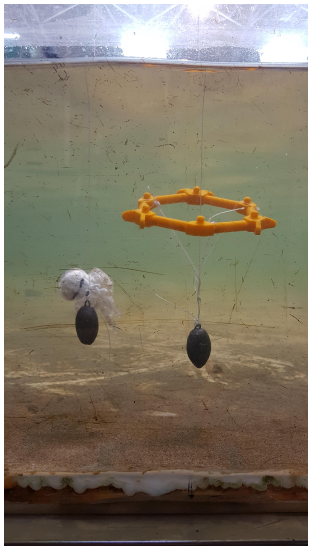


**Figura 4.1:** Teste de visibilidade no tanque

Como se pode observar na figura, os dois objetos eram perfeitamente visíveis através da janela de visualização do canal de ondas, mesmo com a existência de corrente, pelo que não houve nenhum problema de visibilidade. A câmara de vídeo utilizada pôde captar todas as imagens de forma clara.

## 4.3 CANAL HIDRÁULICO DE ONDAS E CORRENTES

O canal de ondas e correntes do Laboratório de Hidráulica da SHRHA, construído em 1999, foi equipado com um novo sistema de geração de agitação marítima no primeiro semestre de 2019. Os trabalhos iniciais de verificação e de ajuste do canal e do sistema de geração de ondas foram realizados por João Chambel [29], numa fase inicial da sua Dissertação de Mestrado, previamente ao estudo experimental que realizou.

O canal hidráulico de ondas e correntes onde foram realizados os ensaios experimentais apresenta cerca de 29 m de comprimento, 1 m de largura e 1 m de profundidade, havendo uma zona do mesmo que possuía duas caixas de sedimentos, com uma profundidade de 1,39 m.

A alimentação do canal era feita através de duas condutas de admissão que ligam um reservatório principal de água ao canal, que se situava a cerca de 3,02 m acima do chão do canal. Ambas as condutas possuem uma válvula reguladora de caudal, sendo que uma delas estava danificada, o que fazia com que fosse impossível saber o caudal exato que era debitado quando a segunda válvula estava aberta. Por sua vez, o reservatório de água principal é alimentado por um reservatório secundário subterrâneo através do uso de duas bombas. No final do canal estava instalada uma comporta, que era utilizada para regular a profundidade da água [29].

Visto que numa fase inicial o canal permitia apenas a realização de ensaios experimentais usando correntes, tiveram que ser feitas alterações e atualizações ao canal de forma a se poderem combinar correntes com ondas.

Tais adaptações incluíram a instalação de um gerador de ondas com 1 m de altura e 1 m de largura da *HR Wallingford*, que permitia a geração tanto de ondas regulares como ondas irregulares. Já as correntes eram geradas através de um prato metálico e uma conduta de admissão, que permitia a água entrar no canal de forma controlada [29].

No final das adaptações, o canal de ondas e correntes ficou configurado como está esquematizado na figura 4.2:

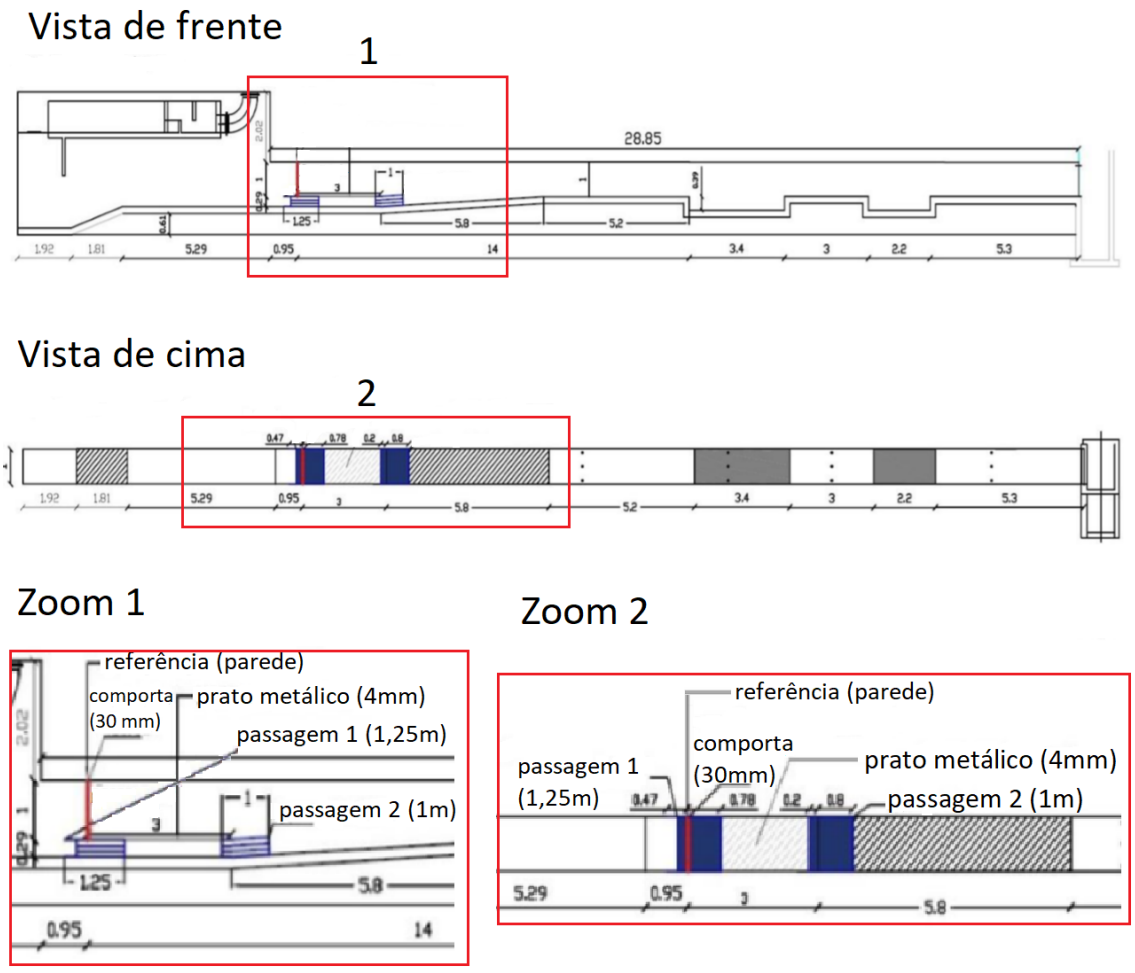



**Figura 4.2:** Configuração do canal de ondas e correntes após adaptações

## 4.4 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS

Após efetuadas todas as adaptações no canal de ondas e correntes, foi instalado o sistema de geração de ondas.

O gerador de ondas foi desenvolvido pela *HR Wallingford* tendo em conta todas as adaptações e configuração do canal. O gerador de ondas tem 1 m de largura, com uma chapa metálica de cerca de 3 m de comprimento disponíveis para colocação dos componentes do gerador. O gerador de ondas movimenta-se apenas num eixo, apresentando um batedor que se move horizontalmente e que tem 1 m de comprimento e 1 m de largura, sendo capaz de gerar ondas regulares e irregulares. Por razões de segurança, a profundidade máxima de água permitida no canal não deve exceder 0,7 m, apesar do batedor ter a capacidade de operar com profundidades de 1 m. Para além disso, o sistema de geração de ondas está equipado

com um módulo de absorção de reflexões, que visa reduzir as ondas refletidas pelo modelo, paredes do canal ou mesmo pela comporta e que se propagam de volta ao batedor, o que causaria uma re-reflexão das ondas originais. Esta situação deve ser evitada visto que as ondas refletidas podem sobrepor-se às ondas originadas pelo batedor, o que cria ondas com tamanho diferente do pretendido [29].

O sistema de geração de ondas, representado na figura 4.3, incorporava também um sistema de emergência, que acionava automaticamente caso fossem geradas ondas que excediam os limites do canal, para além de um software de geração de ondas, *HR Merlin*, controlado por computador, que possui a capacidade de simular vários estados de mar.

**Figura 4.3:** Sistema de geração de ondas [29].

A razão pela qual a profundidade da água foi limitada a 0,7 m prendeu-se com a necessidade de controlar as fugas de água detetadas após a instalação do equipamento no canal de ondas e correntes. Trata-se de um equipamento robusto, que tem já cerca de 20 anos, e que foi modernizado recentemente, o que alterou o seu funcionamento, estando as zonas mais críticas situadas nos perímetros dos caixilhos das janelas de visualização.

## 4.5 MATRIZ DE ENSAIOS À ESCALA

Após efetuados todos os cálculos inerentes à conversão das condições de mar reais para as condições à escala, ficou então definida a matriz de ensaios.

Esta compreendia vários ensaios, para diferentes ângulos de orientação do protótipo em relação à onda, períodos de onda, alturas de onda, velocidades de corrente e tempos de ensaio.

No que toca aos ângulos de orientação do protótipo a serem testados, pode ser observada na figura 4.4 um esquema das 3 orientações escolhidas:

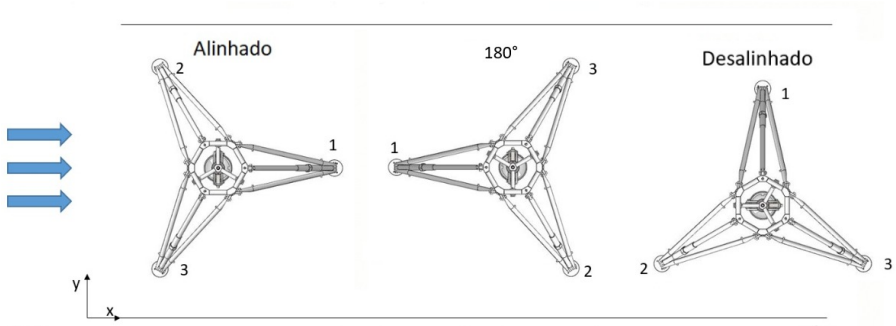



**Figura 4.4:** As 3 orientações do *lander* AMALIA no canal - 90º, alinhado e desalinhado

Sendo assim, para estas diferentes orientações, seria necessário testar o comportamento do protótipo nas seguintes condições de ensaio:

- Apenas com ondas regulares;
- Apenas com ondas irregulares;
- Apenas com correntes;
- Com correntes e ondas regulares;
- Com correntes e ondas irregulares;

A matriz de ensaios final compreendia 387 casos inseridos nas categorias enumeradas acima.

Contudo, o facto da profundidade da água ter sido limitada a 0,7 m fez com que a altura das ondas que é possível gerar no canal fosse também limitada. Para além disso, a ausência de um sistema eficaz de absorção de reflexões no final do canal de ondas e correntes também faz com que o sistema de controlo ativo de reflexões integrado no batedor do sistema de geração

de ondas tenha que absorver ondas refletidas de maior altura, o que limita a capacidade efetiva de geração de ondas. Por estas razões, aliadas ao facto de o tempo necessário para realizar todos esses ensaios ser muito grande, foi definida uma nova matriz de ensaios reduzida, que está representada nas tabelas 6, 7 e 8:

**Tabela 6:** Matriz das ondas regulares (60 a 70 ondas para cada caso)

| Ondas Regulares | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Caso | h [m] | t [s] | f [Hz] | s [s] |
| Caso 1 | 0,1 | 2,6 | 0,385 | 182 |
| Caso 2 | 0,1 | 3,8 | 0,263 | 266 |
| Caso 3 | 0,1 | 5 | 0,2 | 350 |
| Caso 4 | 0,27 | 2,6 | 0,385 | 182 |
| Caso 5 | 0,18 | 3,8 | 0,263 | 266 |
| Caso 6 | 0,15 | 4,5 | 0,222 | 315 |
| Caso 7 | 0,13 | 5 | 0,2 | 350 |
| | | | Total: | 1911 |

**Tabela 7:** Matriz das ondas irregulares 1

| Ondas Irregulares | | | |
|---|---|---|---|
| Caso | hs [m] | t [s] | s [s] |
| Caso 8 | 0,1 | 2,6 | 1365 |
| Caso 9 | 0,1 | 3,8 | 1963 |
| Caso 10 | 0,1 | 5 | 2560 |
| Caso 11 | 0,3 | 2,6 | 1365 |
| Caso 12 | 0,22 | 3,8 | 1963 |
| Caso 13 | 0,17 | 5 | 2560 |
| | | Total: | 11776 |

**Tabela 8:** Matriz das ondas irregulares 2

| Ondas Irregulares | | | |
|---|---|---|---|
| Caso | hs [m] | t [s] | s [s] |
| Caso 14 | 0,1 | 2,6 | 1365 |
| Caso 15 | 0,1 | 2,9 | 1484,8 |
| Caso 16 | 0,3 | 2,6 | 1365 |
| Caso 17 | 0,3 | 2,9 | 1484,8 |
| | | Total: | 5699,6 |

De notar que h corresponde à altura de onda, hs à altura de onda significativa, t ao período da onda e s ao tempo em segundos da duração do ensaio.

No que toca à velocidade da corrente a ser testada no canal de ondas e correntes, o seu valor era de 1 m/s

## 4.6 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes da realização dos ensaios experimentais, era necessário encher o canal com água, com recurso a uma comporta no fundo do canal que permitia ajustar a altura da água para 70cm, ajustar a válvula reguladora de caudal para obter o valor de velocidade de corrente

pretendido, colocar o modelo à escala dentro de água, colocar a câmara de vídeo no local desejado, ligar o hardware (gerador de ondas), ligar os 3 computadores necessários para utilizar os diferentes programas de sofware: HR Merlin, para introdução de dados, HR Daq Suite para aquisição de dados e Vectrino para medição de velocidade de corrente.

Após efetuados todos estes passos, a realização dos ensaios seguia sempre uma sequência pré-definida:

- Introdução de dados;
- Calibração das sondas de nível, que estavam conectadas ao software de aquisição de dados;
- Verificação do software de aquisição de dados;
- Ligação da câmara de vídeo;
- Execução do ensaio;
- Aquisição de dados.

Após finalizados os ensaios, a comporta do canal era novamente aberta de modo a esvaziá-lo, sendo a água bombeada de volta para o reservatório com recurso a uma bomba hidráulica. Para além disso, os dados obtidos eram guardados, sendo de seguida desligados todos os programas e computadores utilizados, assim como o gerador de ondas.

## 4.7 RESULTADOS

O que se verificou no final dos ensaios foi que a velocidade máxima da corrente que foi possível obter no canal de ondas e correntes foi de 0,3 m/s, bastante aquém do valor de 1 m/s que era esperado testar.

No decurso dos testes preparatórios, verificou-se ainda que a instalação ainda não reunia as condições necessárias para atingirem as velocidades do escoamento e alturas e períodos de onda pretendidos. Tal resulta, principalmente, de se terem detetado problemas de estanquidade para níveis de água elevados (i.e., 0,7 m à escala geométrica 1:9), havendo a ocorrência de uma fuga que não foi possível resolver a tempo, o que impossibilitou o ajuste do sistema de geração de ondas para que pudesse gerar todas as ondas com as características pretendidas e que seriam fundamentais para se compreenderem os problemas do sistema

*lander* que estão na origem deste estudo. Estas razões impossibilitaram a conclusão dos ensaios em falta dentro da janela de tempo destinada aos mesmos.

Dos casos que foram possível testar, foram observadas as imagens gravadas pela câmara de vídeo, e verificou-se que em nenhum dos casos a estrutura sofria qualquer tipo de deslocamento. No que toca às deformações da estrutura, o facto de não se ter utilizado uma câmara de alta velocidade impediu a verificação das mesmas.

Assim, os ensaios experimentais acabaram por ser inconclusivos, visto que não foi possível simular todas as condições de mar definidas anteriormente, principalmente aquelas que teriam uma ação mais intensiva sobre o modelo.

# Capítulo 5

# Simulação Numérica

Como foi referido no Capítulo 4, as conclusões dos ensaios experimentais ficaram aquém das expectativas iniciais, tendo, no entanto, sido obtidas conclusões gerais sobre o funcionamento do sistema *lander*.

De notar que não foi estudada a possibilidade da estrutura tombar quando sujeita ao valor da velocidade da corrente em estudo, de 1 m/s. De facto, se admitirmos que as pernas do *lander* estão na posição mais crítica, ou seja, observando a figura 3.4, para $\theta$ = 25º e $H_{amalia}$ = 2036, a força de arrasto induzida, ao ser aplicada na parte de cima do *lander*, poderia fazer com que o mesmo tombasse. Contudo, para a velocidade de corrente obtida, de 0,3 m/s, verificou-se que a estrutura não se desloca nem tomba, pelo que se considerou que o mesmo se passaria para o valor de corrente de 1 m/s e que as poitas são densas o suficiente para manter toda a estrutura assente e fixa no solo sem sofrer qualquer tipo de deslocamento. Para além da utilização de poitas, existem mais formas de assegurar que o *lander* se mantém fixo no fundo do mar. Por exemplo, poderiam ser utilizadas 3 âncoras, cada uma conectada ao apoio de cima de cada perna do *lander* através de um cabo tensor. Contudo, aquando do projeto do *lander* ficou decidido que a escolha iria recaír sobre a colocação de poitas feitas em betão nos apoios do *lander*, e que tal seria suficiente para assegurar que o *lander* se mantém fixo no fundo do mar, razões pelas quais não se considerou este problema durante os capítulos seguintes desta dissertação.

Deste modo, foi realizada uma simulação numérica remotamente através do computador, com o intuito de otimizar o modelo atual e construir um *digital twin* do mesmo.

Na verdade, decidiu-se escolher o módulo central que inclui a esfera para fazer análise CFD e análise estrutural no software Ansys, que permite simular interações em várias áreas da engenharia, como por exemplo na física, mecânica dos fluídos, vibrações, estruturas, ou transferência de calor. A razão de escolha desta peça em específico prende-se com o facto de incorporar não só o equipamento mais caro, como também possuir a maior área de contacto com o fluído, pelo que se considerou ser, por isso, a parte mais crítica da estrutura, principalmente no seu suporte de fixação.

Dessa forma, foi selecionada então a peça, representada na figura 5.1 , de modo a que se tenha perceção dos valores dos esforços impostos na mesma decorrentes do arrasto gerado por uma corrente de 1 m/s de velocidade, que foi o valor que se pretendeu simular durante os ensaios experimentais. De notar que apenas foi considerada a colocação do *lander* em águas pouco profundas, onde as correntes são uma solicitação importante devido à ondulação.

A razão de se terem simulado apenas correntes, ao invés de ondas, prende-se com o facto de não ter havido tempo suficiente, aliado ao facto da ocorrência da pandemia COVID-19, que dificultou ainda mais este processo. Apesar da ondulação ser também importante, os

objetivos da dissertação sofreram alterações, pelo que a simulação numérica foi realizada na última fase da mesma. Assim, ficou decidido simular correntes, visto que para a componente da geometria do *lander* que constitui o garfo, a corrente tem maior impacto, já que é onde se verifica o maior efeito de arrasto. Para além disso, considerou-se que a orientação do módulo central perante o escoamento seria perpendicular pelo facto de ser essa orientação cuja área de exposição ao escoamento é maior, induzindo assim maior arrasto na estrutura.

Na figura 5.1 está representada o módulo central que inclui a esfera do *lander* AMALIA:

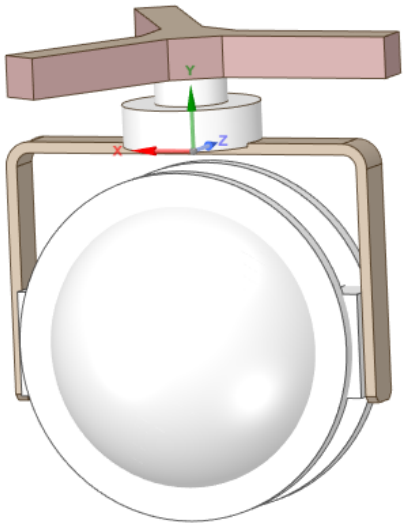



**Figura 5.1:** Módulo central que inclui a esfera do *lander* AMALIA

Nos subcapítulos seguintes estão reportados todos os passos executados para executar a simulação numérica.

## 5.1 SIMULAÇÃO CFD - ANSYS FLUENT

### 5.1.1 Geometria

Antes de se poder correr a simulação no software Ansys, foi necessário preparar a geometria da peça em causa, de maneira a que se pudesse criar a melhor malha de elementos finitos que permitisse obter o melhor equilíbrio entre o tempo requerido para a simulação e a fiabilidade dos resultados obtidos.

Para isso, foi criada uma caixa com as dimensões 12,5x5x5 à volta da peça, caixa essa que representa o domínio no qual iria ocorrer o escoamento. A razão de ser destas dimensões deve-se ao facto de se pretender que o domínio no qual ocorre o escoamento seja o maior

possível. Contudo, deve ser encontrado um equilíbrio de modo a que o poder computacional utilizado e o tempo gasto para correr a simulação sejam razoáveis, pelo que uma regra geral é que as dimensões da caixa sejam de pelo menos 5 vezes maiores do que as dimensões da peça nas três direções, embora que o ideal seja de 10 vezes maior. Para além disso, o comprimento entre a peça e a saída do domínio deve ser o maior, entre 5 a 15 vezes o tamanho da peça. A ideia geral é que as fronteiras estejam longe o suficiente da peça de forma a que os efeitos do escoamento que se verificam nas paredes não interfiram com o escoamento à volta da peça [30][31][32].

Tendo em conta esta regra geral, bem como após alguma tentativa e erro para descobrir as dimensões ideais, foram então definidas as dimensões da caixa. Contudo, visto que a peça é simétrica, simplificou-se o domínio também, tendo-se feito um corte a meio, o que permitiu reduzir tanto o número de elementos como o tempo de simulação sem comprometer os resultados. Assim, as dimensões do domínio acabaram por ser 12,5x5x2,5, sendo que a distância entre a entrada do domínio e a origem da peça é de 5 metros, e a distância entre a origem da peça e a saída do domínio é de 7,5 metros.

Na figura 5.2 pode-se observar a caixa/domínio em questão (a), bem como uma aproximação na peça (b):

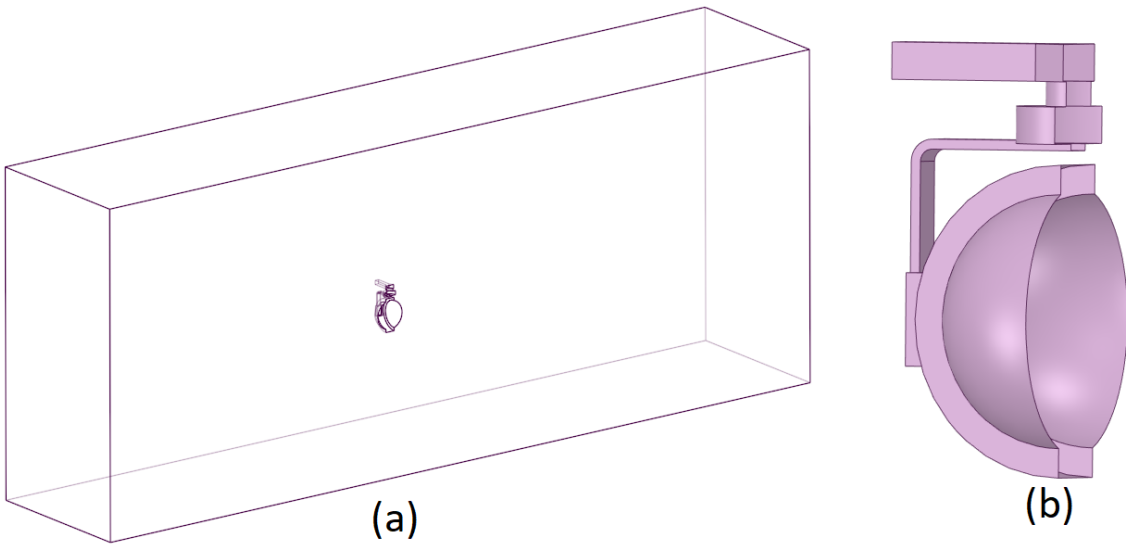



**Figura 5.2:** Caixa/domínio do escoamento (a) e aproximação na peça (b)

### 5.1.2 Malha

O passo seguinte foi preparar a malha de elementos finitos que melhor permitisse, como referido acima, alcançar o melhor equilíbrio entre o tempo de simulação e a fiabilidade dos resultados, isto é, uma análise de convergência.

A malha de elementos finitos utilizada durante a simulação CFD era composta por elementos tetraédricos lineares de 4 nós, cada um com 3 graus de liberdade, que correspondem às translações nas direções x, y e z.

Um dos fatores principais que se teve em conta foi o *skewness* da malha obtida, que está diretamente ligado à qualidade da mesma e a possibilidade de ela ser boa o suficiente para obter resultados fiáveis. O *skewness* é medido entre os valores 0 e 1, sendo que se define pela diferença entre a forma de uma célula e a forma de outra célula equilateral de volume equivalente. Quando o valor do *skewness* é muito elevado, pode diminuir a precisão e desestabilizar a solução final, pelo que a regra geral é que o *skewness* máximo da malha deve ser menor do que 0,95 [33], pelo que na simulação em causa foi decidido que teria de estar abaixo de 0,9 para que a malha pudesse realmente fornecer resultados credíveis.

Assim, foram estudadas várias malhas, com diferente número de elementos, pelo que a escolha final recaíu sobre as cinco malhas que estão descritas na tabela 9:

**Tabela 9:** Malhas estudadas durante as simulações e características das mesmas

| Malha | Nº de elementos | Nº de nós | *Skewness* máximo | Tempo de simulação [hh:mm:ss] |
|---|---|---|---|---|
| Malha 1 | 2.299.017 | 415.377 | 0,869 | 02:29:12 |
| Malha 2 | 2.418.717 | 435.233 | 0,893 | 02:26:49 |
| Malha 3 | 2.556.208 | 459.291 | 0,898 | 02:28:53 |
| Malha 4 | 2.697.509 | 484.242 | 0,866 | 02:47:10 |
| Malha 5 | 2.800.500 | 501.904 | 0,888 | 02:46:15 |

Na figura 5.3 (a) pode observar-se a malha 3 descrita na tabela 8, sendo que na figura 5.3 (b) fez-se uma aproximação à zona da peça, que permitiu visualizar melhor os elementos nessa zona, que são muito pequenos:

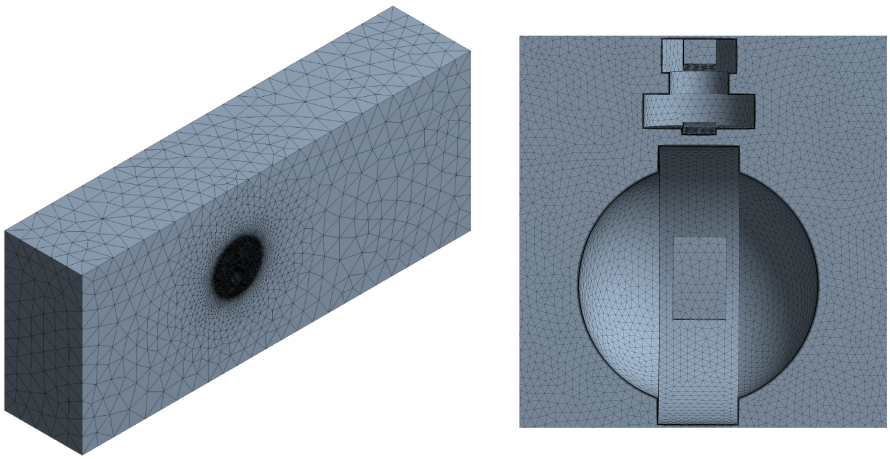



**Figura 5.3:** Malha 3 (a) e aproximação detalhada da malha 3 na vizinhança do objeto (b)

De notar que foi necessário refinar a malha nas zonas mais próximas da peça, visto ser a zona em que o escoamento sofre maiores alterações. Assim, o número de elementos nas regiões próximas da peça são muito mais elevados do que nas zonas mais afastadas.

Após refinada a malha, foi então corrida a simulação no Ansys Fluent. Para isso, foi necessário definir vários parâmetros, entre eles:

- Regime de escoamento

  Foi considerado que o escoamento se processava em regime permanente, ou seja, que a velocidade num certo ponto do escoamento não variava com o tempo [34].

  Para além disso, o escoamento é turbulento, visto que a trajetória das partículas varia com o tempo [35].

- Modelo turbulento

  O modelo turbulento escolhido foi o K Omega SST.

  A razão de escolha deste modelo turbulento prende-se com o facto de ser um modelo utilizado para muitas aplicações aerodinâmicas e que se adequa muito bem a simulações de escoamentos turbulentos na subcamada viscosa [36].

- Fluido do escoamento (água do mar)

- Velocidade de escoamento

  Como referido anteriormente, a velocidade de corrente testada foi de 1 m/s, visto que simula as condições reais.

- Condições de fronteira

  Aqui foram definidas as condições de fronteira do escoamento, entre elas a entrada de velocidade, saída de pressão e paredes do escoamento.

- Valores de referência

  Os valores de referência incluíam a área da secção da peça, que tinha o valor aproximado de 0,28 $m^2$, a massa volúmica da água do mar, de 1025 $kg/m^3$, temperatura, de 288,16 K, velocidade da corrente, de 1 m/s e viscosidade dinâmica do fluido a 15ºC, de 0,001003 kg/ms.

- *Outputs* pretendidos

  No que toca aos parâmetros de *output* necessários, eles foram a pressão, o coeficiente de arrasto e a força de arrasto.

- Número de iterações

  Após tentativa e erro, verificou-se que o número ideal de iterações foi de 250, de maneira a que os valores de pressão, coeficiente de arrasto e força de arrasto do gráfico gerado durante a simulação convergissem.

Após corrida a simulação, obtiveram-se os gráficos do coeficiente de arrasto, força de arrasto e pressão.

Nas figuras 5.4, 5.5, 5.6 apresentam-se os gráficos descritos acima, respetivamente, obtidos com o uso da malha 3:

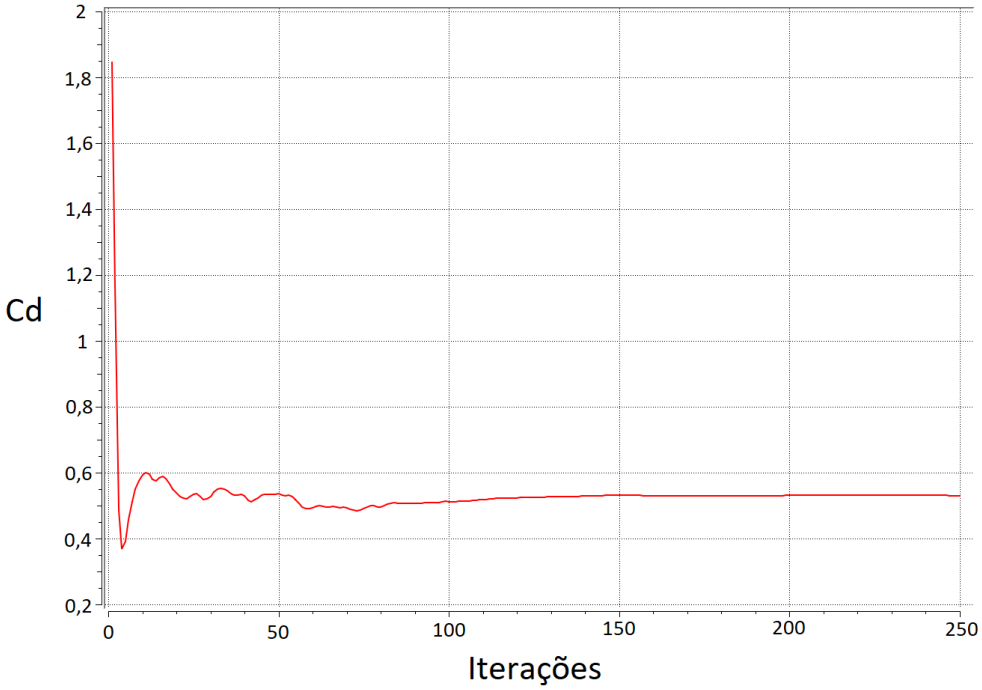



**Figura 5.4:** Gráfico do coeficiente de arrasto da malha 3

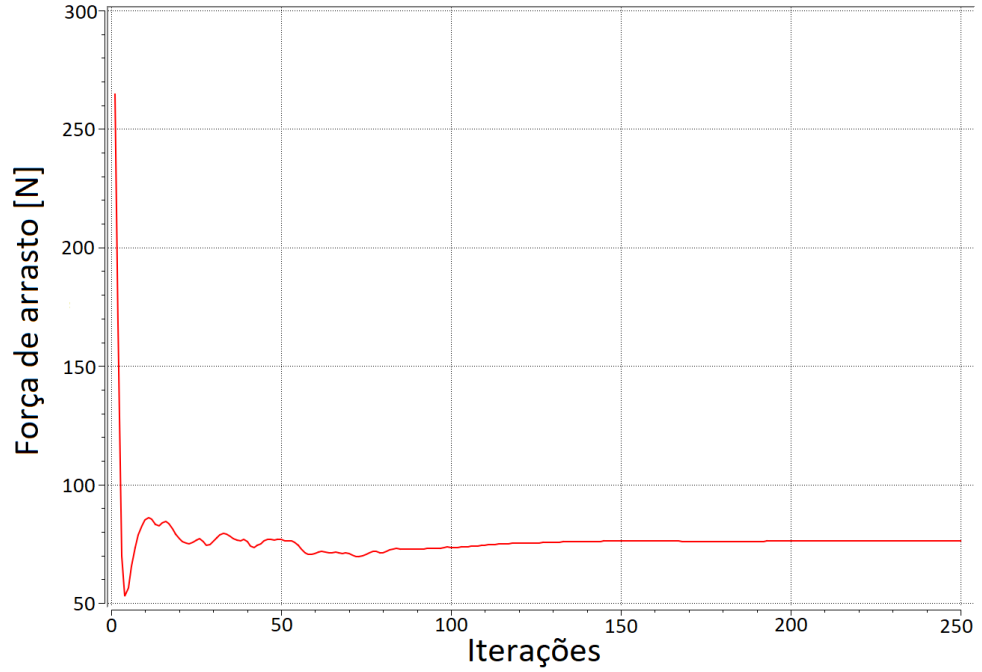



**Figura 5.5:** Gráfico da força de arrasto da malha 3

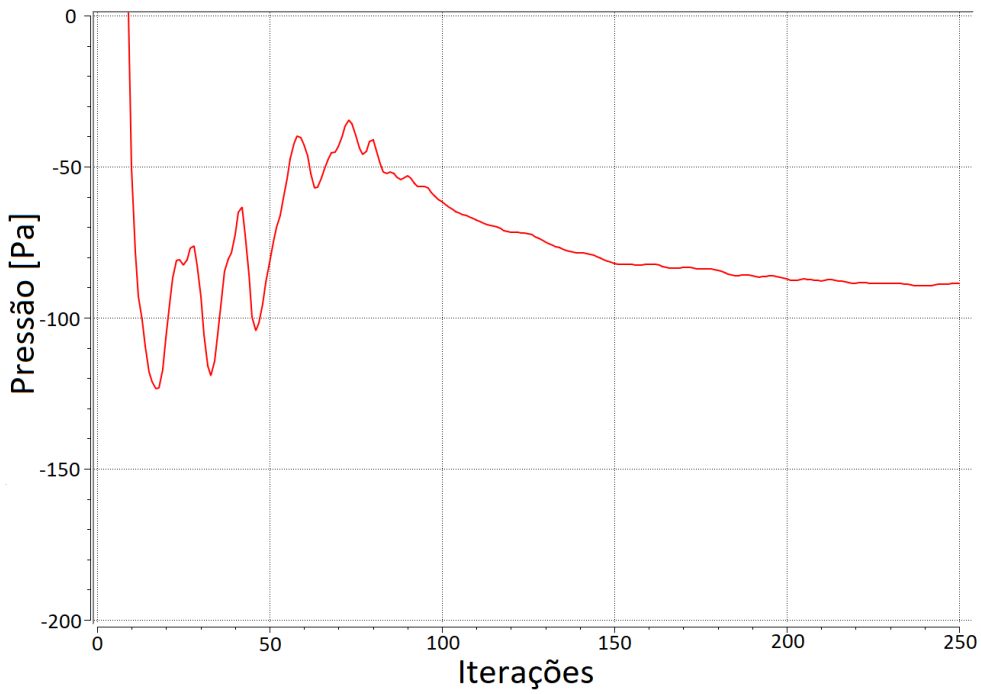



**Figura 5.6:** Gráfico da pressão da malha 3

Visto que os gráficos obtidos tanto na malha 3 como nas restantes malhas são idênticos, pois convergem para valores semelhantes, não houve a necessidade de expor os mesmos nesta dissertação.

Contudo, na tabela 10 expõe-se uma comparação entre os valores obtidos nas cinco malhas:

**Tabela 10:** Valores do coeficiente de arrasto, força de arrasto e pressão obtidos nas cinco malhas

| Malha | Tamanho dos elementos [mm] | Coeficiente de arrasto | Força de arrasto [N] | Pressão [Pa] |
|---|---|---|---|---|
| Malha 1 | 15,6 | 0,534 | 76,658 | -94,832 |
| Malha 2 | 15,3 | 0,530 | 76,068 | -82,025 |
| Malha 3 | 15 | 0,530 | 76,116 | -88,662 |
| Malha 4 | 14,7 | 0,531 | 76,254 | -88,004 |
| Malha 5 | 14,5 | 0,532 | 76,336 | -89,690 |

Como se pode observar na tabela, os valores do coeficiente de arrasto e força de arrasto convergem para valores idênticos nas três malhas, à exceção do valor da pressão, que apresenta uma ligeira diferença.

Para além disso, foi também desenhado um gráfico da influência da malha no valor obtido do coeficiente de arrasto, representado na figura 5.7:

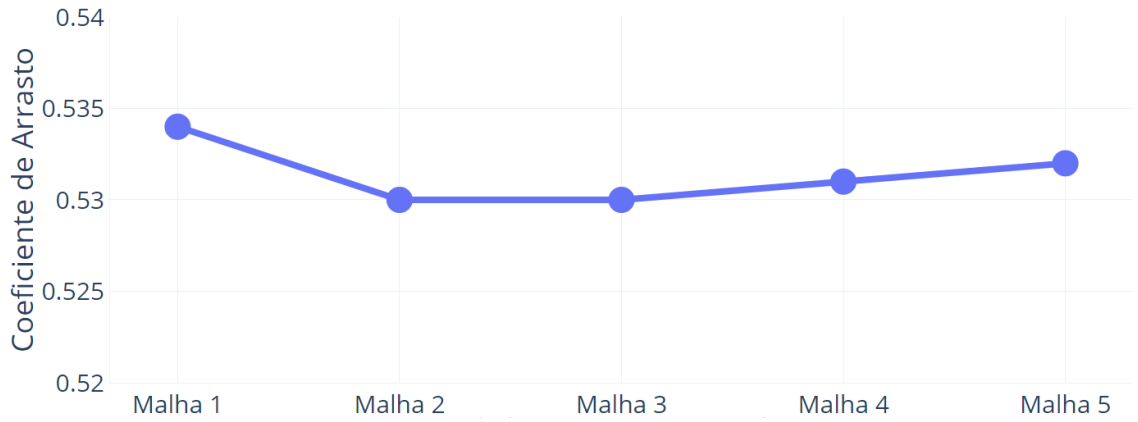



**Figura 5.7:** Influência da malha no valor do coeficiente de arrasto

Isto permitiu concluir que as malhas escolhidas estavam já bastante refinadas, visto que os valores do coeficiente de arrasto obtidos para as diferentes malhas estão muito próximos entre si, pelo que não houve necessidade de refinar ainda mais.

### 5.1.3 Resultados da simulação em CFD

Neste subcapítulo faz-se uma análise aos resultados obtidos durante a simulação no software ANSYS. Primeiramente, fez-se uma comparação entre o valor obtido para o coeficiente de arrasto e o valor tabelado na literatura para uma esfera lisa, bem como uma explicação da diferença entre esses dois valores. De seguida, foi feita uma análise dos contornos de pressão estática que a peça sofreu devido ao escoamento, bem como das linhas de escoamento.

#### 5.1.3.1 Coeficiente de arrasto - Diferença entre o valor obtido e o valor tabelado

No geral, o valor do coeficiente de arrasto, Cd, não é constante para qualquer forma do corpo do objeto em causa, sendo que varia com a velocidade do escoamento e com o número de *Reynolds* [37].

Uma esfera lisa, por exemplo, apresenta valores para o coeficiente de arrasto que vão desde valores elevados para escoamentos laminares até valores que rondam 0,47 para escoamentos turbulentos , com número de *Reynolds* na ordem dos $10^4$ [37][38].

Na figura 5.8 podem observar-se alguns exemplos de valores do coeficiente de arrasto para diferentes tipos de objetos e para número de *Reynolds* aproximadamente $10^4$:

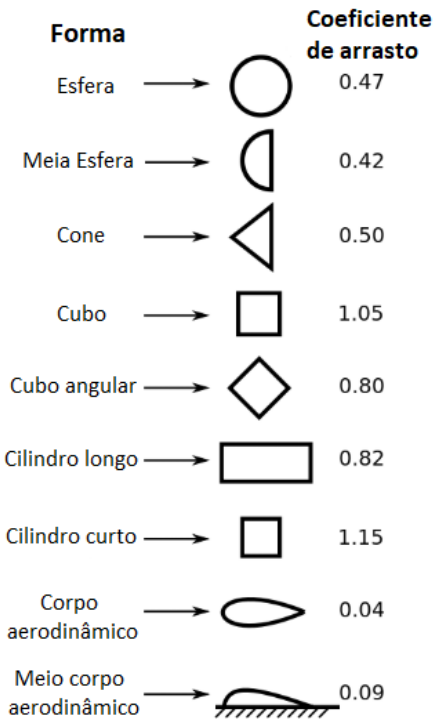



**Figura 5.8:** Valores do coeficiente de arrasto para diferentes tipos de objetos [37]

Já na figura 5.9 está representada a variação do coeficiente de arrasto de uma esfera em função do seu número de *Reynolds*:

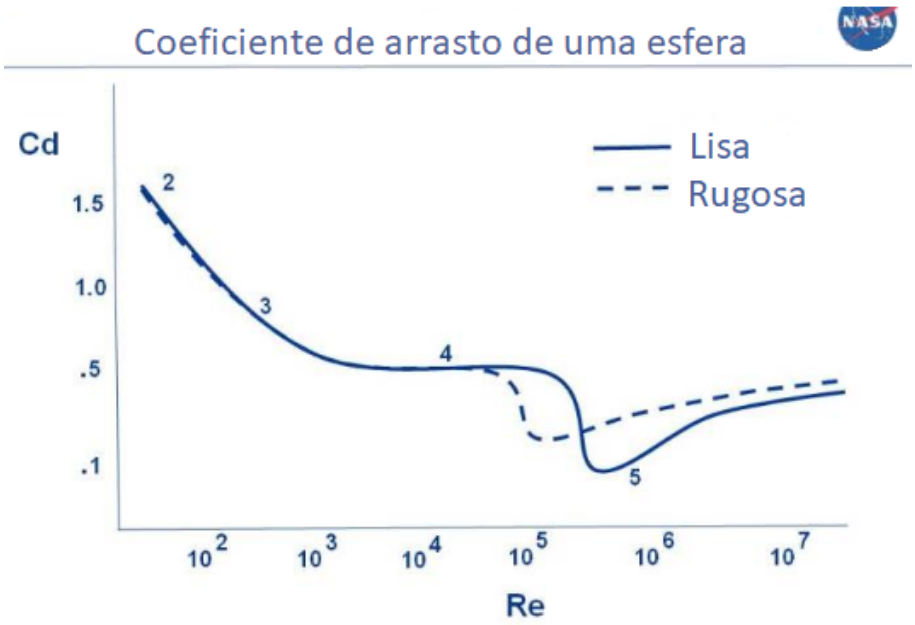



**Figura 5.9:** Valores do coeficiente de arrasto de uma esfera em função do número de *Reynolds* [38].

Após analisar o gráfico representado na figura 5.11, pode verificar-se qual o valor do coeficiente de arrasto teórico que se obteria dependendo do número de *Reynolds* verificado no modelo em questão.

O cálculo do número de Reynolds pode ser feito através da seguinte expressão [37]:

$$Re = \frac{V * \rho * L}{\mu} \tag{2}$$

Sendo:

- V: velocidade de escoamento [m/s];
- $\rho$: massa volúmica do fluido de escoamento [kg/$m^3$];
- L: comprimento de referência do objeto [m];
- $\mu$: viscosidade dinâmica do fluido [kg/ms].

Ora, sabendo que a esfera da peça é lisa e apresenta um raio de 0.216 m, então o seu comprimento de referência é igual ao seu diâmetro, 0,432 m. Já a velocidade de escoamento é de 1 m/s, como referido anteriormente, sendo a massa volúmica da água do mar 1025 kg/$m^3$ e a viscosidade dinâmica à temperatura de 15ºC igual a 0,001003 kg/ms. Assim, substituindo na expressão (2) do cálculo do número de *Reynolds* vem que:

$$Re = 4,415 * 10^5 \tag{3}$$

Observando o gráfico da figura 5.9, verifica-se que o valor do coeficiente de arrasto da esfera para o valor do número de Reynolds de 4,415*$10^5$ se situa aproximadamente entre 0,1 e 0,2.

Para validar estes valores, foi executada uma simulação no Ansys apenas com a esfera com 0,216 m de raio.

Foram realizadas 250 iterações durante a simulação, à semelhança do que foi feito anteriormente para a peça completa, pelo que o gráfico do coeficiente de arrasto obtido está representado na figura 5.10:

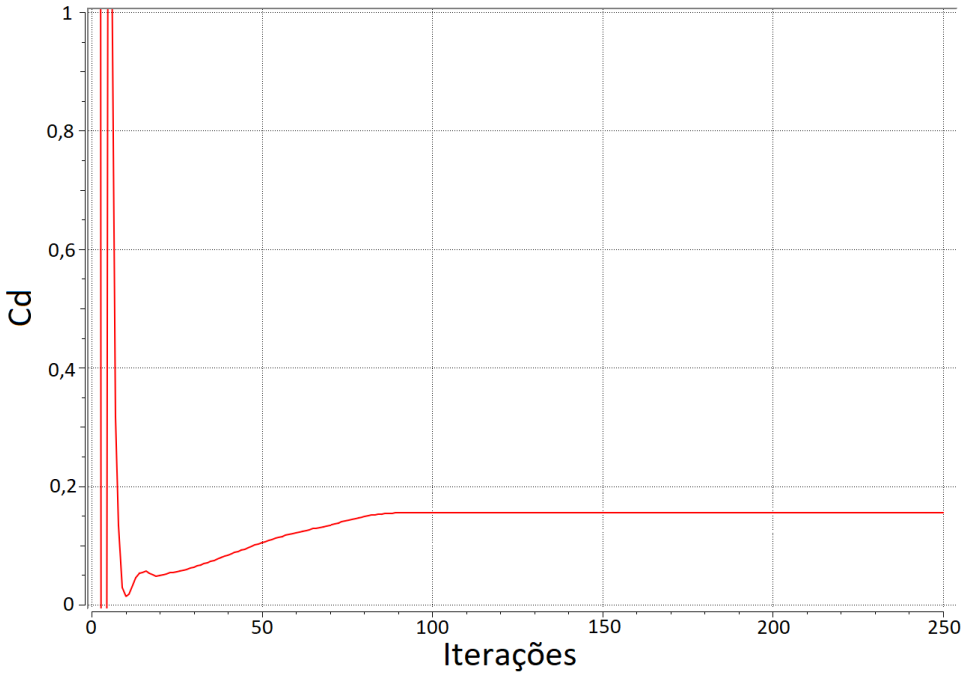



**Figura 5.10:** Gráfico do valor do coeficiente de arrasto obtido para uma esfera lisa

O valor do coeficiente de arrasto convergiu para 0,156, o que valida o valor obtido através do cálculo analítico e observação do gráfico da figura 5.9.

Assim, pode-se fazer uma comparação do valor do coeficiente de arrasto obtido apenas para a esfera e o obtido para a peça completa.

Como descrito anteriormente, o valor do coeficiente de arrasto obtido para a peça completa é de aproximadamente 0,53, mais elevado do que o valor de 0,156 obtido para a esfera lisa. Isto pode ser justificado pelo facto de a peça completa não ser uma esfera lisa, apresentando também um garfo, pelo que estas irregularidades na superfície da peça podem justificar esta discrepância entre o valor teórico e o valor obtido no software Ansys. Para além disso, a área de referência da secção da esfera lisa é de 0,07325 $m^2$, muito menor que o valor de 0,28 $m^2$ da peça completa, o que permite justificar também a discrepância. Por tudo isto, visto que a diferença entre os valores do coeficiente de arrasto não é muito elevada, é razoável assumir que o valor obtido de 0,53 está correto.

#### 5.1.3.2 Pressão estática e vetores de escoamento

Concluída a simulação, foram desenhados os contornos dos valores de pressão estática sofrida pela peça devida ao escoamento, bem como os vetores de escoamento, onde se pode verificar as variações de velocidade e os seus valores. Para além disso, os vetores de

escoamento permitem observar as zonas de estagnação e as zonas onde o escoamento se torna turbulento, permitindo assim saber quais as zonas mais indicadas para se instalar sensorização.

Na figura 5.11 pode observar-se os contornos de pressão estática sofrida pela módulo central devido ao escoamento:

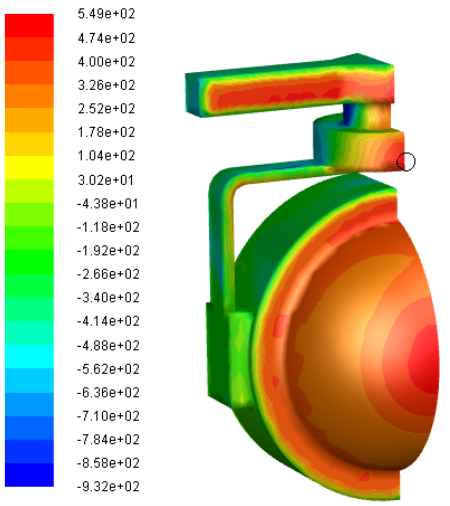



**Figura 5.11:** Contornos de pressão estática no módulo central (Valores em Pascal)

Quanto aos vetores de escoamento, podem ser observados na figura 5.12 e 5.13:

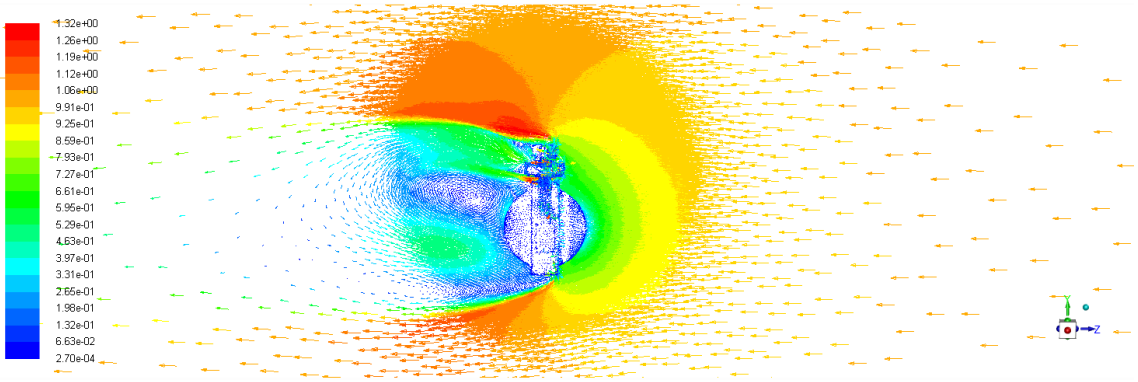



**Figura 5.12:** Vetores de escoamento e valores da velocidade de corrente 1 [m/s]

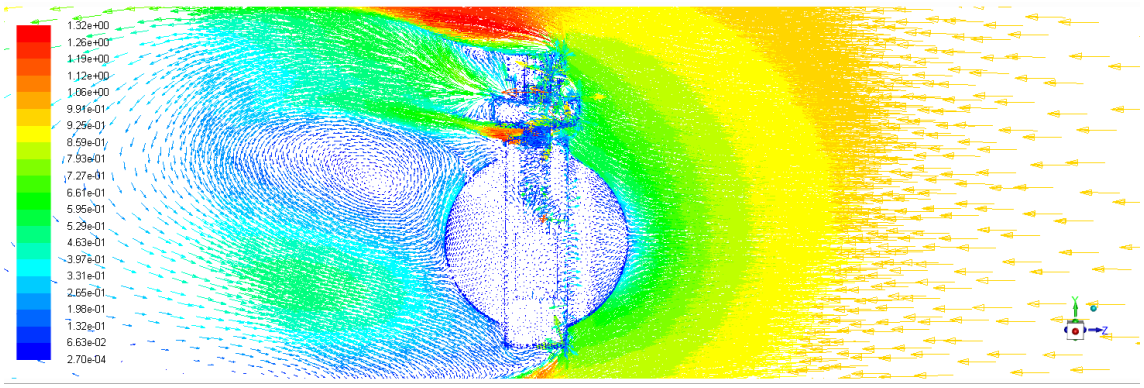



**Figura 5.13:** Vetores de escoamento e valores da velocidade de corrente 2 [m/s]

Foram também efetuadas algumas aproximações à peça, de forma a poder visualizar melhor as zonas turbulentas, representadas nas figuras 5.14 e 5.15:

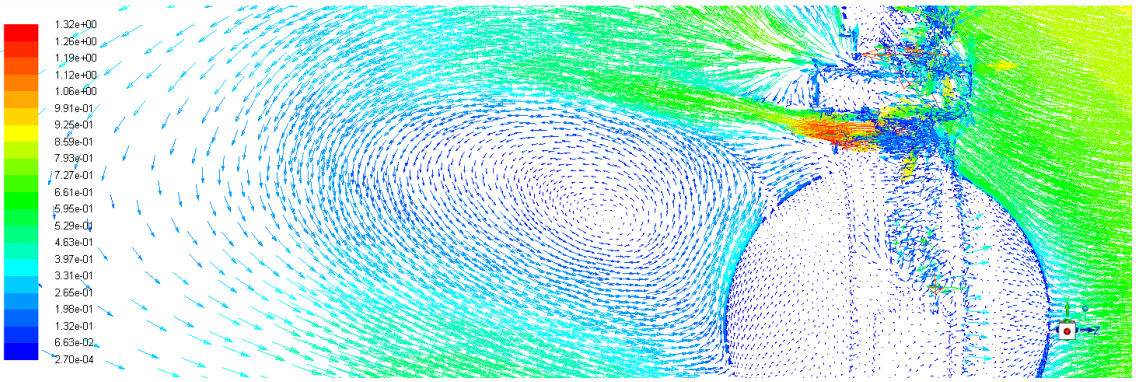



**Figura 5.14:** Zonas turbulentas em cima

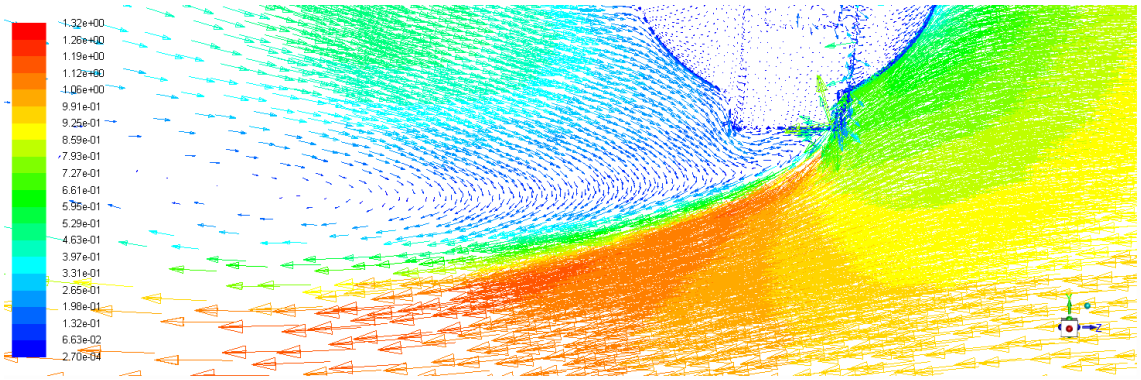



**Figura 5.15:** Zonas turbulentas em baixo

## 5.2 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL - ANSYS MECHANICAL

Concluídas as simulações em CFD no software Ansys Fluent, foi realizada uma análise estrutural para perceber o efeito das cargas induzidas pelo escoamento sobre a estrutura.

Para isso, foram importadas as pressões estáticas exercidas sobre a estrutura, expostas no subcapítulo 5.3.1.2, para o software Ansys Mechanical.

Contudo, a peça completa é composta por diversos componentes construídos em materiais diferentes. Para melhor compreender todos os componentes da peça e os seus materiais constituintes, decompôs-se a peça completa em componentes diferentes: a esfera de vidro; o mancal, aros, suportes da esfera e ligação entre o garfo e mancal, construídos em POM; e o garfo, construído em aço inoxidável.

Assim, para determinar as tensões que ocorrem devidas às cargas submetidas, foi necessário criar *named selections* no software, ou seja, separar cada área da superfície da peça sujeita ao escoamento e retirar os valores da pressão estática individualmente, para que fossem depois importados.

No subcapítulo seguinte são expostos os valores de pressão estática que ocorrem sobre essas superfícies específicas.

### 5.2.1 Pressões estáticas individuais

Criadas as *named selections*, foram então obtidos os valores da pressão estática para as diferentes áreas em questão.

Na tabela 11 expõe-se os valores da pressão estática máxima obtidos para as diferentes superfícies das *named selections*:

**Tabela 11:** Valores da pressão estática máximos obtidos para o mancal, ligação garfo-mancal, garfo, suportes da esfera, aros e esfera

| Superfície | Pressão estática máxima [Pa] |
|---|---|
| Mancal | 500 |
| Ligação garfo-mancal | 515 |
| Garfo | 392 |
| Suportes da esfera | -19,2 |
| Aros | 436 |
| Esfera | 519 |

As figuras que incluem os gradientes da pressão estática nas diferentes superfícies estão anexadas no fim desta dissertação.

### 5.2.2 Parâmetros da simulação

Após obtidas as pressões estáticas para cada área, foram definidos os parâmetros da análise estrutural no software Ansys Mechanical, entre eles:

- Força da gravidade atuante na estrutura
- Apoios, situados no mancal
- Pressão hidrostática (considerou-se a pressão hidrostática efetuada a 10 m de profundidade)
- Pressões atuantes em cada área de superfície (*named selection*)

As figuras que incluem os parâmetros deste simulação estão anexadas no fim desta dissertação.

### 5.2.3 Malha

O passo seguinte foi a definição dos parâmetros da malha. A malha gerada era composta por elementos tetraédricos quadráticos de 10 nós, cada um com 3 graus de liberdade, que correspondem às translações nas direções x, y e z. Não foi possível comparar várias malhas visto que ocorria de forma frequente um erro durante a geração da malha, por razões desconhecidas, possivelmente devido a memória insuficiente do computador. Contudo, foi possível gerar uma malha, com um valor de *skewness* médio de 0,231, valor bastante aceitável para se assumir que a solução obtida é razoável. De notar que a malha foi refinada no mancal e na zona de ligação entre o mancal e o garfo, visto que se admitiu ser a zona mais crítica da peça, pois é onde está colocado o suporte de fixação.

Na figura 5.16 pode observar-se a malha gerada na estrutura:

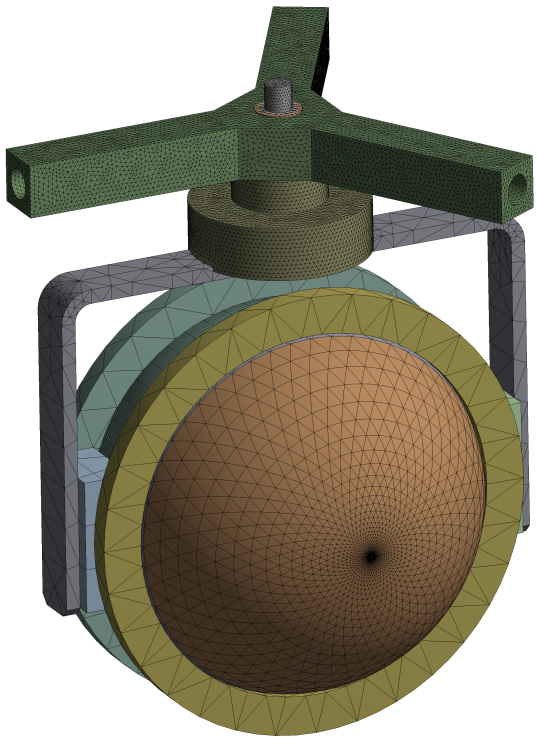


**Figura 5.16:** Malha gerada para a análise estrutural

A malha gerada apresenta 429.526 elementos e 624.985 nós, sendo o tamanho dos elementos de 5 mm no mancal e na zona de ligação entre o mancal e o garfo, e de 50 mm nos restantes componentes.

### 5.2.4 Resultados da simulação estrutural no Ansys Mechanical

Depois de ter sido definida a malha, bem como os parâmetros da simulação, o passo seguinte foi a execução da mesma.

Os dados pretendidos são as deformações totais e as tensões equivalentes de *von Mises*.

De notar que é importante analisar as conexões entre os diferentes componentes da peça completa, visto que são zonas que podem ser críticas e onde pode haver rotura.

Para além disso, o mancal atua como suporte de fixação, sendo a zona à qual estão ligados todos os componentes da peça. Todas as cargas a que a estrutura eventualmente se sujeite, serão transferidas para o mancal, pelo que se admitiu ser a zona mais frágil. Por esse motivo, é uma zona suscetível de rotura, pelo que deve ser bem analisada.

O escoamento simulado anteriormente teve a direção (0,0,-1). De forma a perceber a resposta da estrutura quando sujeita a outras direções de corrente, foram também simuladas cargas na direção perpendicular ao escoamento (90º), na direção (1,0,0) e uma carga vertical

aplicada de cima para baixo apenas no mancal, direção (0,-1,0). Admitiu-se que os valores das cargas nessas direções seriam os mesmos, mas aplicadas nessas mesmas orientações definidas. A razão para não se ter simulado em CFD outras direções de escoamento prende-se com a falta de tempo. Contudo, admitindo que as cargas são as mesmas, pode-se estudar também o comportamento da estrutura quando sujeita a escoamentos em várias direções, o que é útil para encontrar pontos críticos nas várias direções.

De seguida são representados os gradientes de deformação e de tensão observados quando aplicadas cargas em cada um das três direções:

#### 5.2.4.1 Deformação total - direção do escoamento, (0,0,-1)

Na figura 5.17 está representada a deformação total obtida na estrutura:

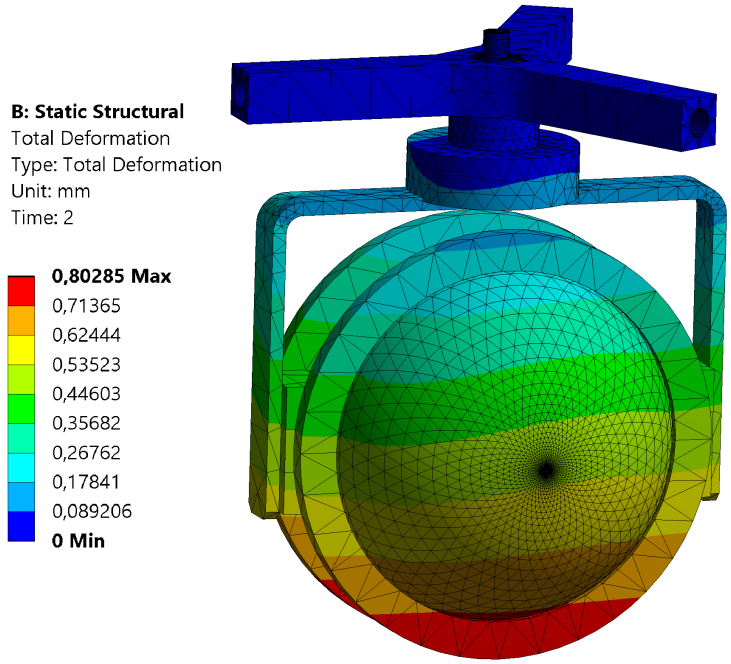



**Figura 5.17:** Deformação total obtida após a simulação na direção (0,0,-1)

A observação da figura 5.17 permite concluir que a deformação é crescente de cima para baixo, pelo que a zona do mancal é a que sofre menos deformação por ser o local onde está apoiada toda a peça.

#### 5.2.4.2 Tensão equivalente de *von Mises* - direção do escoamento, (0,0,-1)

Na figura 5.18 está representada a tensão equivalente de *von-Mises* obtida na estrutura:

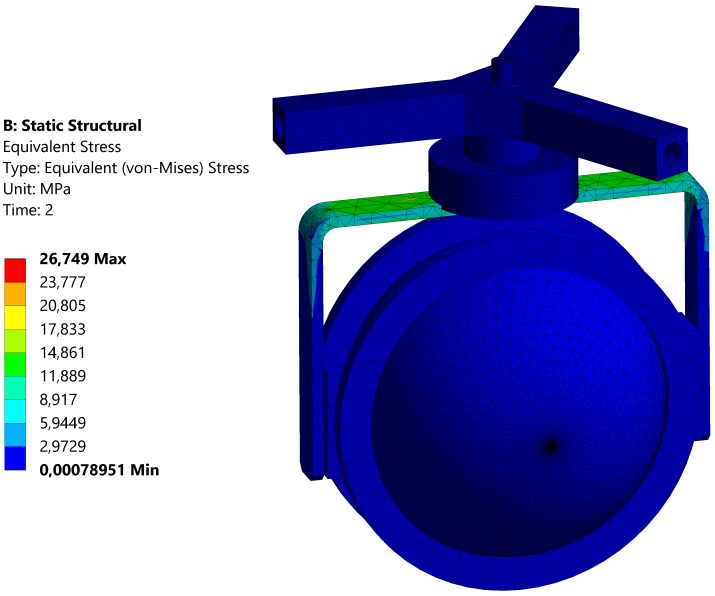



**Figura 5.18:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1)

Após observar a figura 5.18, verifica-se que os valores mais elevados de tensão foram obtidos no garfo. Isto deve-se ao facto de o material constituinte do garfo ser o aço inoxidável. É importante referir que, apesar de as tensões serem superiores no garfo, a tensão limite de escoamento do aço inoxidável é muito superior à do POM, pelo que é importante analisar também os fabricados em POM em separado, como está representado na figura 5.19:

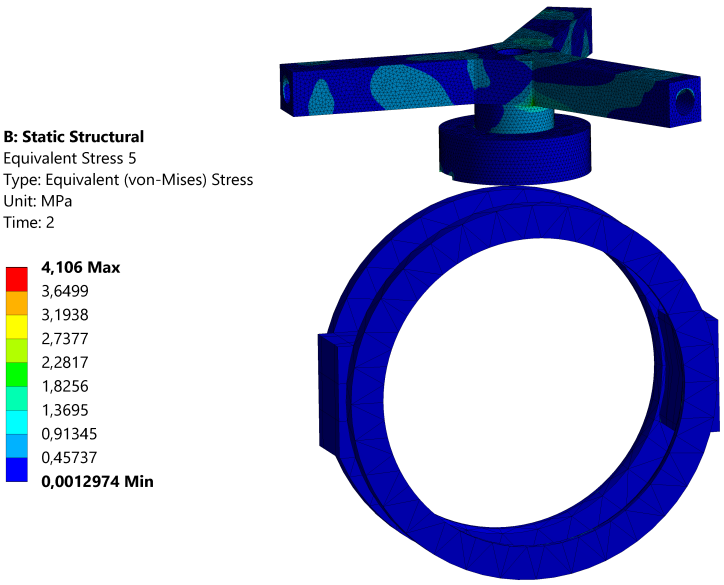



**Figura 5.19:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para os componentes fabricados em POM

Na verdade, ao analisar a figura 5.19 verifica-se que a tensões nos componentes em POM são mais elevadas no mancal e na conexão entre o mancal e o garfo. Assim, foi feita uma aproximação nestes componentes, como se pode ver na figura 5.20, 5.21 e 5.22:

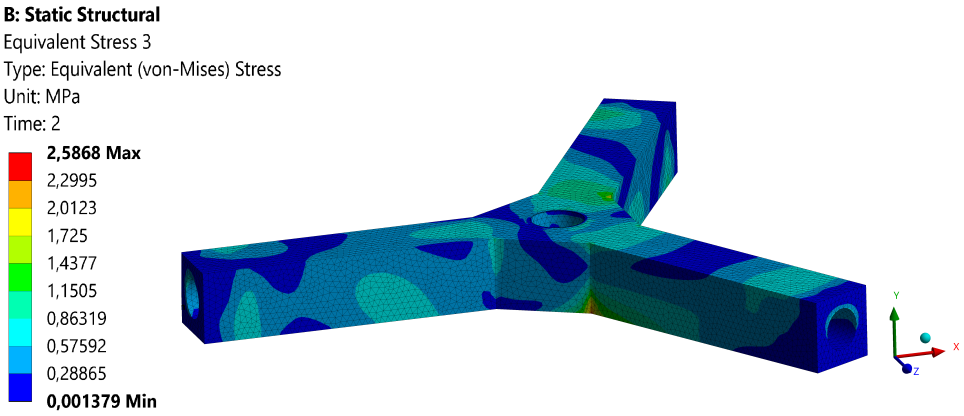



**Figura 5.20:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal - vista de cima

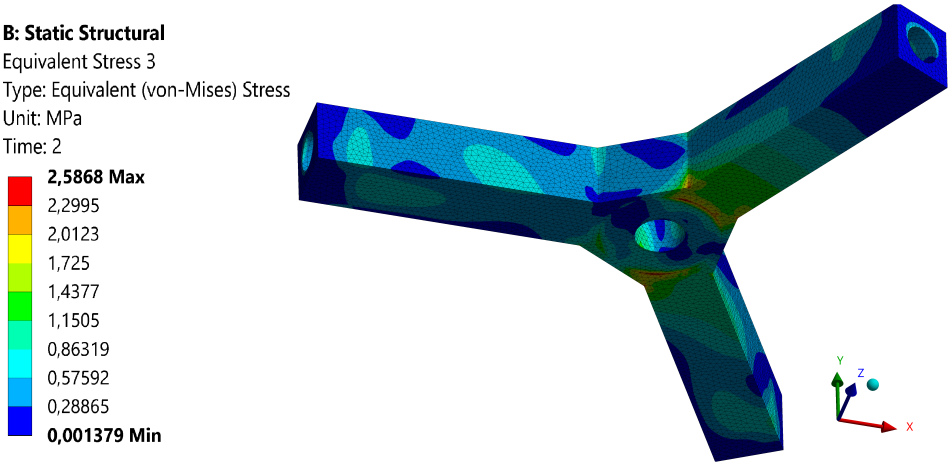



**Figura 5.21:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal - vista de baixo

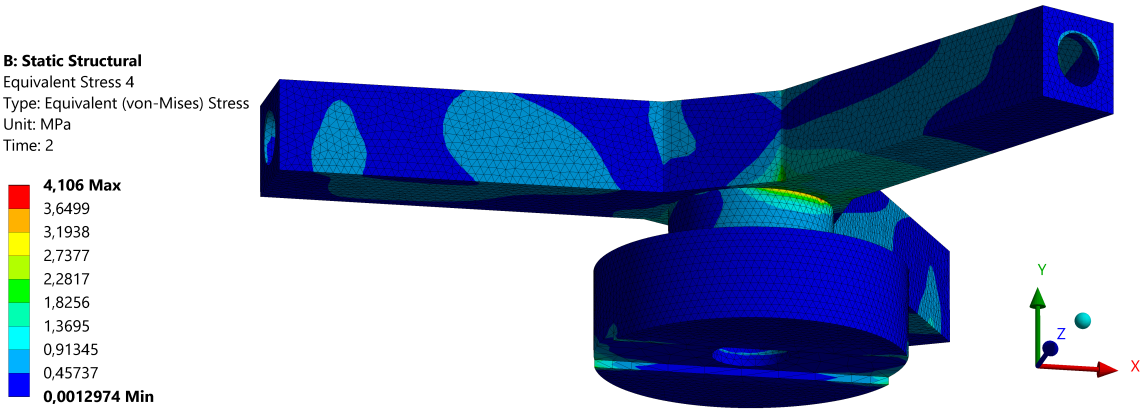



**Figura 5.22:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (0,0,-1) para o mancal e a conexão entre o mancal e o garfo

Através da observação da figura 5.22 verifica-se, portanto, que uma zona de concentração de tensões situa-se na conexão entre o mancal e o garfo, pelo que é uma zona que deve ser monitorizada.

A tensão de *von Mises* máxima obtida para o aço inoxidável é de 26,7 MPa e para o POM é de 4,1 MPa.

#### 5.2.4.3 Deformação total - direção perpendicular ao escoamento, (1,0,0)

Na figura 5.23 está representada a deformação total obtida na estrutura:

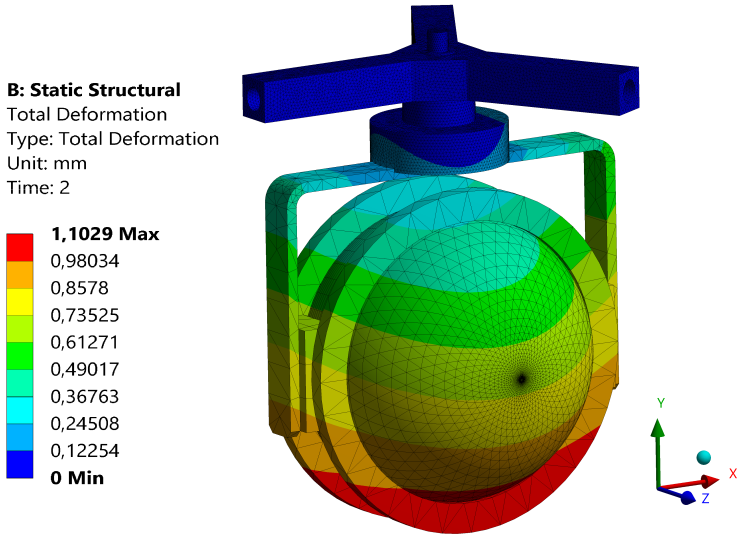



**Figura 5.23:** Deformação total obtida após a simulação na direção (1,0,0)

De notar que a deformação máxima verificada quando a carga é aplicada na direção (1,0,0) é ligeiramente superior do que o valor obtido na direção (0,0,-1), sendo de cerca de 1,1 mm ao invés de 0,8 mm.

#### 5.2.4.4 Tensão equivalente de *von Mises* - direção perpendicular ao escoamento, (1,0,0)

À semelhança do capítulo 5.2.4.2, nas figuras 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 estão representadas as tensões de *von Mises*, mas obtidas quando a carga é aplicada na direção perpendicular ao escoamento, (1,0,0):

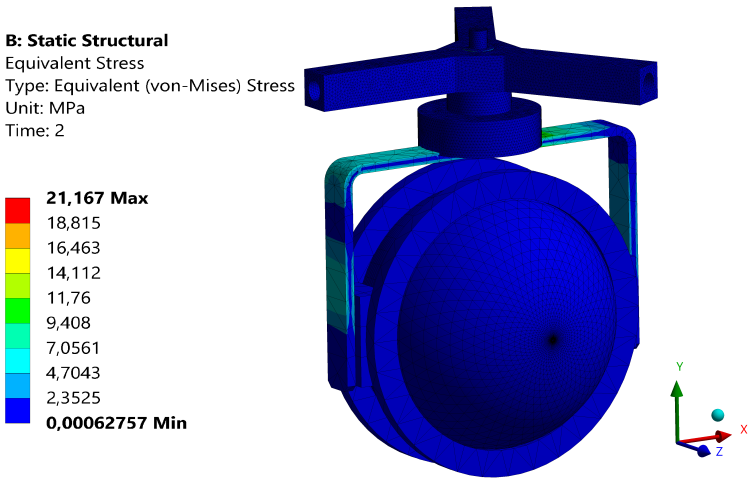



**Figura 5.24:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0)

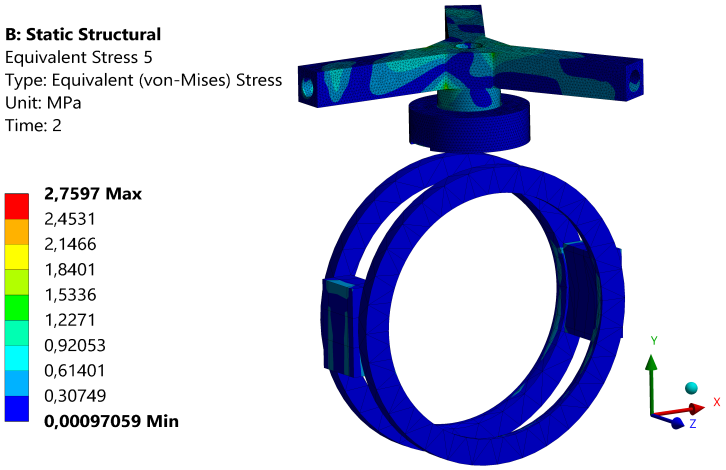



**Figura 5.25:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para os componentes fabricados em POM

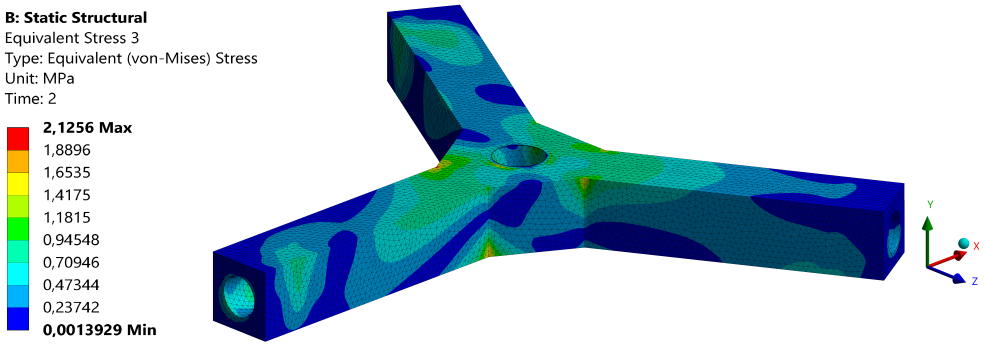



**Figura 5.26:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal - vista de cima

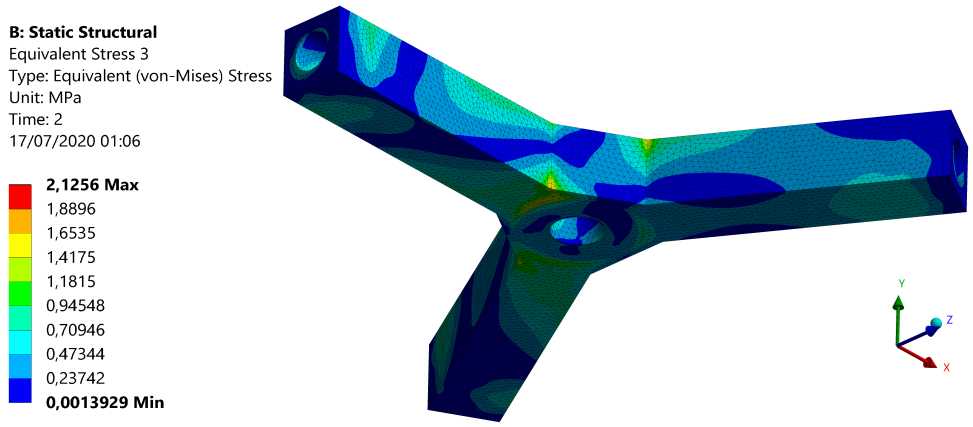



**Figura 5.27:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal - vista de baixo

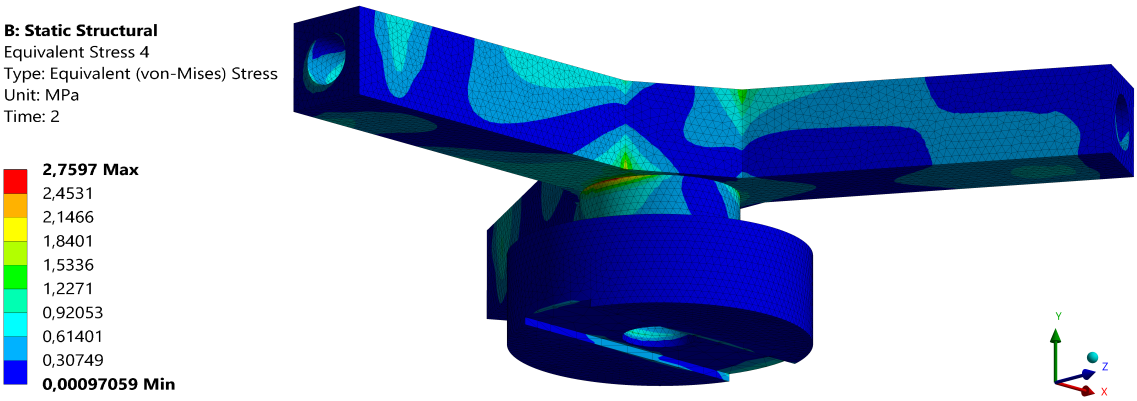



**Figura 5.28:** Tensão de *von Mises* obtida após a simulação na direção (1,0,0) para o mancal e a conexão entre o mancal e o garfo

Assim, verifica-se que as tensões de *von Mises* obtidas após a simulação na direção (1,0,0) são mais baixas, tanto nos componentes em aço inoxidável, como nos componentes em POM. A tensão de *von Mises* máxima obtida para o aço inoxidável é de 21,2 MPa e para o POM é de 2,8 MPa

#### 5.2.4.5 Deformação total - direção vertical, (0,-1,0)

O passo seguinte foi a simulação de uma carga apenas no mancal e na conexão entre o mancal e o garfo, na direção (0,-1,0). Deste modo, pode-se perceber o comportamento do mancal quando sujeito não só a cargas frontais e laterais, como verticais. Na figura 5.29 estão representadas as deformações totais obtidas na estrutura:

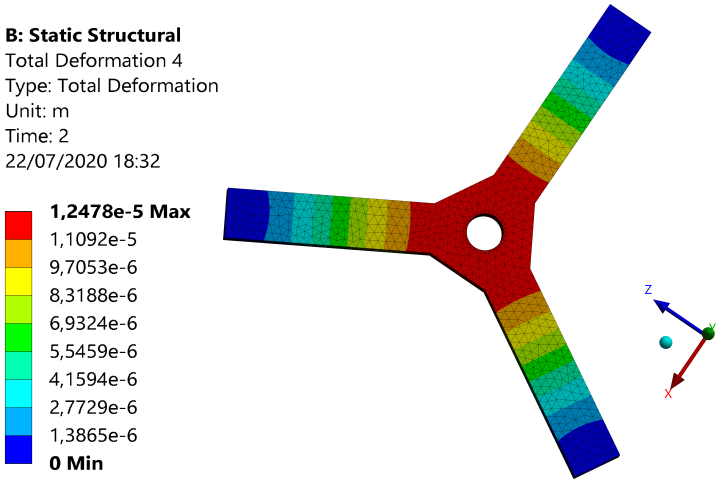



**Figura 5.29:** Deformação total obtida após a simulação na direção (0,-1,0) para o mancal

#### 5.2.4.6 Comparação entre a tensão equivalente de von Mises e a tensão limite de escoamento

De forma a verificar se a estrutura sujeita à corrente em causa sofre algum tipo de rotura, deve-se ter em conta a tensão limite de escoamento dos materiais. Com efeito, de forma a que haja uma margem de segurança, assumiu-se que a tensão máxima que a que se pode sujeitar os materiais sem que ocorra rotura ou fratura é de 70% da tensão limite de escoamento [39].

Na tabela 12 pode observar-se uma comparação entre os valores da tensão limite de escoamento do POM e do aço inoxidável utilizado para fabricar o garfo:

Assim sendo, reduzindo os valores da tabela 12 para 70%, verifica-se que a tensão máxima, $\sigma_{max}$, para os dois materiais é:

**Tabela 12:** Comparação entre o valor da tensão limite de escoamento do POM e do aço inoxidável utilizado para fabricar o garfo

| Material | Tensão limite de Escoamento [MPa] |
|---|---|
| Aço Inoxidável | 207 |
| POM | 66 |

**Tabela 13:** Comparação entre o valor do $\sigma_{max}$ do POM e do aço inoxidável utilizado para fabricar o garfo

| Material | $\sigma_{max}$ [MPa] |
|---|---|
| Aço Inoxidável | 144,9 |
| POM | 46,2 |

Ora, comparando os valores $\sigma_{max}$ de ambos os materiais, com os valores máximos das tensões de *von Mises* obtidos durante a simulação, representados nas figuras 5.18 e 5.19, verifica-se que a tensão de *von Mises* máxima que ocorre no aço inoxidável, com o valor de 26,7 MPa, é muito inferior ao seu $\sigma_{max}$. O mesmo se aplica ao POM, cujo valor de tensão de *von Mises* máximo é de 4,1 MPa, pelo que se pode concluir que a estrutura não sofre qualquer tipo de rotura devida às cargas submetidas pelo escoamento.

Contudo, é importante ter uma noção das zonas críticas da estrutura, de forma a se poder saber quais os locais onde se deve instalar sensorização. Esta análise é feita no capítulo 6 mais pormenorizadamente.

# Capítulo 6

# Análise de Resultados

## 6.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Após concluídos os ensaios experimentais, verificou-se que não foi possível simular as condições a que o protótipo esteve sujeito em ambiente real.

Como foi referido anteriormente, os problemas de estanquidade causavam a ocorrência de fugas quando a altura da água do canal chegava aos 0,7 m. Este problema impossibilitou a realização de todos os ensaios definidos, visto que não houve tempo para reparar a fuga.

Contudo, a execução dos ensaios experimentais foi fundamental para perceber o funcionamento do sistema *lander* no fundo do mar, e como a sua configuração e orientação pode alterar o seu comportamento quando sujeito a ondas e correntes.

## 6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### 6.2.1 Simulação em CFD - Ansys Fluent

Ora, após a conclusão da simulação numérica em CFD, é importante perceber onde não se pode colocar sensorização.

Com efeito, observando novamente os vetores de escoamento descritas no subcapítulo 5.1.3.2, verifica-se que na parte traseira da peça, ou seja, na parte oposta à zona onde o escoamento incide frontalmente, o escoamento torna-se turbulento, pelo que não faria sentido colocar sensorização nessa zona. Por exemplo, a incorporação de um sensor de velocidade na parte traseira da peça iria medir valores de velocidade que sofrem grandes oscilações e mudanças de direção, dada a turbulência verificada nessa zona. Contudo, esta situação só se verifica para direções de corrente constantes, pelo que qualquer mudança de direção da mesma implica uma mudança da zona turbulenta.

Assim, visto que a peça é sujeita a diferentes direções e intensidades de corrente, a análise CFD não é suficiente para detetar os potenciais pontos onde se deve colocar sensorização.

### 6.2.2 Simulação estrutural - Ansys Mechanical

A obtenção dos resultados das simulações estruturais no Ansys permite analisar mais ao pormenor quais as zonas críticas onde se deve instalar sensorização.

A melhor forma de proteger a estrutura é evitar que as tensões submetidas na mesma sejam superiores às tensões limite.

Na verdade, visto que o aço inoxidável apresenta o maior valor de $\sigma_{max}$, é o material onde mais dificilmente ocorre rotura. Apesar de o POM ser o material que sofre menor tensão,

no valor de 4,1 MPa, é também o material com menor valor da tensão limite, pelo que o foco deve estar no POM e nos compontentes da estrutura fabricados neste material, mais precisamente no mancal, visto ser que se admitiu ser a zona mais crítica. Como referido anteriormente, o mancal atua como suporte de fixação e é onde estão ligados todos os componentes da peça, pelo que qualquer carga submetida na estrutura é transferida para o mancal.

Como se pôde observar no capítulo 5.2.4, os valores das tensões que ocorrem na estrutura variam consoante a direção de aplicação da carga, isto é, com a direção do escoamento. Na verdade, um sistema de monitorização estrutural deve ser capaz registar dados, relacionando as deformações detetadas com as intensidades e direções da solicitação. Assim, é importante também poder instalar sensorização que permita obter não só as tensões, mas também a direção e a intensidade da corrente.

Observando as figura 5.21, 5.22, 5.27 e 5.28, verifica-se uma zona que se pode chamar de crítica, dada a maior incidência de tensões de *von Mises*, que é a zona da conexão entre o mancal e a ligação entre o mesmo e o garfo. Essa zona é solicitada tanto em flexão como em torsão, pelo que sofre os valores mais elevados de tensão, tanto quando a carga é aplicada na direção do escoamento, (0,0,-1), como também na direção perpendicular ao escoamento (1,0,0).

Uma solução que atende aos requisitos mencionados é a instalação de 3 rosetas de extensómetros, uma em cada braço do mancal, com ângulos de 0º/60º/120º, por exemplo. As rosetas permitem medir as deformações a partir das quais se consegue calcular as tensões, pelo que cada uma das rosetas mede 3 sinais cujo valor é proporcional à velocidade da corrente. Assim, através da leitura das deformações, as rosetas permitem que se possa calcular os valores de tensão para as 3 direções do escoamento em cada um dos 3 pontos. Deste modo, é possível obter não só os valores das tensões equivalentes de *von Mises*, como também ficar a conhecer as inter-relações entre os 3 sinais que variam com a intensidade e com a direção da corrente.

Por conseguinte, a instalação de rosetas permitem saber, após obtenção e processamento dos dados, tanto as tensões de equivalentes de *von Mises*, que permitem verificar se ultrapassam a tensão limite ou não, como também a direção e intensidade da corrente.

De notar que, caso a estrutura sofra uma carga vertical de cima para baixo, por exemplo, o valores lidos nas 3 rosetas poderão ser muito próximos, indicando portanto que a direção da carga é vertical.

Na figura 6.1 pode observar-se uma representação esquemática da solução mencionada, onde se incluem os locais de instalação das rosetas:

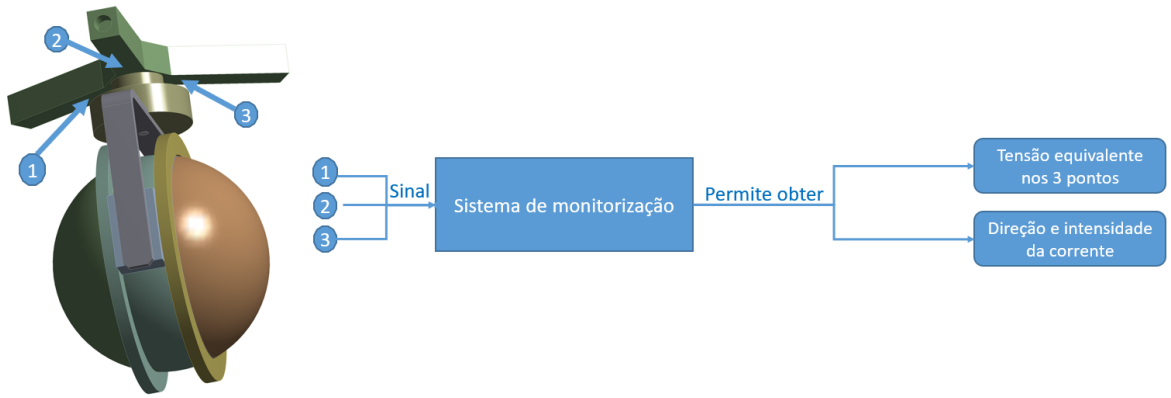



**Figura 6.1:** Representação esquemática da solução para a instalação das rosetas 1, 2 e 3

Esta solução permite obter um sinal em "duplicado", que tanto permite saber se as tensões submetidas na estrutura estão abaixo das tensões limite, como também se o valor da corrente ultrapassa um certo valor limite, criando-se aqui uma "redundância" favorável. Na realidade, em caso de falha ou avaria de uma das rosetas, as outras duas ainda se encontram funcionais e podem permitir ainda medir as tensões de *von Mises* nesses pontos.

Por tudo isto, a instalação de um sistema de monitorização estrutural com 3 rosetas de extensómetros nos 3 pontos do mancal selecionados é uma forma eficaz de monitorizar a estrutura e de ajudar a previnir roturas ou falhas, bem como medir tanto a intensidade como a direção da corrente.

# Capítulo 7

# Conclusão e Trabalhos Futuros

Com este trabalho, foi possível perceber a importância que os *landers* têm no estudo do fundo dos oceanos, bem como o papel que a monitorização estrutural dos mesmos tem em assegurar o seu baixo custo de manutenção e fiabilidade elevada ao longo do tempo. Para além disso, verificou-se que os materiais escolhidos para a construção deste tipo de estruturas é crucial para atingir um equilíbrio entre os seus custos e as propriedades que proporcionam.

No que toca aos ensaios experimentais, permitiram perceber como se pode construir um protótipo à escala e testar o *lander* AMALIA em laboratório e em canais de ondas e correntes. Para além disso, foi importante para perceber como funciona toda a instrumentação necessária, desde sondas de velocidade, sondas de nível, até ao sistema de aquisição de dados.

Já a simulação númerica envolveu um estudo do software ANSYS, pelo que permitiu entender como existem ferramentas acessíveis e intuitivas para simular condições reais em computador. As simulações efetuadas ajudaram a perceber o comportamento da peça crítica do *lander* selecionada quando sujeita a correntes, tendo sido importante para o cálculo das pressões estáticas, para a observação das linhas de escoamento e para o cálculo das tensões de *von Mises*, o que foi fundamental para poder detetar os pontos mais críticos e os pontos de interesse para instalação de sensorização.

Visto que neste trabalho foi analisado apenas o módulo que inclui a esfera central do *lander*, que se considerou ser a peça mais crítica pelo facto de incorporar o equipamento mais caro e possuir a maior área de contacto com o fluído, então os trabalhos futuros poderiam passar por fazer uma análise das pernas do *lander*, ou então fazer uma análise da estrutura inteira. Para além disso, poderiam ser validados os modelos numéricos com dados experimentais através da realização de mais ensaios em laboratório, ou então poder-se-ia

testar mais direções de ondas e correntes.

# BIBLIOGRAFIA


1. NOAA Office of Ocean Explorationand Research, "What Is Ocean Exploration and Why Is It Important?". Disponível em https://oceanexplorer.noaa.gov/backmatter/whatisexploration.html. Acesso em 17 Junho 2020

2. Filipe Assis Gonçalves et al. "Numerical modelling of full-scale subsea lander AMALIA with in-situ conditions". Em: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - MaritimeEngineering, 2020. ISSN: 1741-7597. DOI: 10.1680/jmaen.2019.29

3. INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL. Disponível em http://www.inegi.pt/instituicao.asp?idm=1idsubm=5&LN=. Acesso em 17 Junho 2020

4. Publications Office of the EU, "The EU blue economy report 2019". Disponível em https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/676bbd4a-7dd9-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en/. Acesso em 19 Junho 2020

5. Economia Azul, "ECONOMIA AZUL: A NOVA ECONOMIA DO MAR". Disponível em https://www.economiaazul.pt/economia-azul-economia-do-mar. Acesso em 19 Junho 2020

6. European Comission, "2020 Blue Economy Report: Blue sectors contribute to the recovery and pave way for EU Green Deal". Disponível em https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_986. Acesso em 17 Junho 2020

7. Eduardo Silva et al. "TURTLE - A robotic autonomous deep sea lander". Em: OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016, 2016. ISBN: 9781509015375. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761262

8. Hugo Alves, "Conceção de um Sistema Modular submersível para monitorização da Costa Marítima (Benthic Lander)", 2017

9. Vikrant P. Shah, "Design considerations for engineering Autonomous Underwater Vehicles", 2007. DOI: 10.1575/1912/1883

10. James Cameron's Deep Sea Challenge 3D, "DEEP SEA CHALLENGE - THEN AND NOW". Disponível em http://www.deepseachallenge.com/the-sub/then-and-now/. Acesso em 17 Junho 2020

11. GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, "ROV KIEL 6000". Disponível em https://www.geomar.de/en/centre/central-facilities/tlz/rovkiel6000/overview/. Acesso em 10 Maio 2020

12. Russell B. Wynn et al. "Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience". Em: Marine Geology 352, 2014. ISSN: 00253227. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.03.012

13. General Dynamics Mission Systems, "Bluefin-21 Unmanned Underwater Vehicle (UUV)". Disponível em https://gdmissionsystems.com/products/underwater-vehicles/bluefin-21-autonomous-underwater-vehicle. Acesso em 10 Maio 2020

14. Louis L. Whitcomb et al. "Navigation and control of the Nereus hybrid underwater vehicle for global ocean science to 10,903 m depth: Preliminary results". Em: Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. ISBN: 9781424450381. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509265

15. A. Tengberg et al. "Benthic chamber and profiling landers in oceanography - A review of design, technical solutions and functioning", 1995. DOI: 10.1016/0079-6611(95)00009-6

16. University of Aberdeen Oceanlab, "Case Study: The ROBIO Lander". Disponível em https://www.abdn.ac.uk/oceanlab/business/case-study-robio.php. Acesso em 10 Maio 2020

17. K.U.M. Umwelt - und Meerestechnik Kiel GmbH, "Lander K/MT 100". Disponível em http://www.kum.homepage.t-online.de/eng/lander.pdf. Acesso em 10 Maio 2020

18. P. M. Bagley et al. "Deep-ocean Environmental Long-term Observatory System (DELOS):- Long-term (25 year) monitoring of the deep-ocean animal community in the vicinity of offshore hydrocarbon operations". Em: OCEANS 2007 - Europe, 2007. ISBN: 1424406358. DOI: 10.1109/oceanse.2007.4302250

19. João Pedro Santana et al. "Innovative Benthic Lander for Macroalgae Monitoring in Shallow-Water Environments". Em: Journal of Marine Science and Application, 2020. ISSN: 19935048. DOI: 10.1007/s11804-020-00128-4

20. Marco Mota Gonçalves, "SISTEMA AUTÓNOMO DE MONITORIZAÇÃO SUBAQUÁTICA COM VARIAÇÃO DE FLUTUABILIDADE PARA O PROJECTO MARINEYE", 2017

21. Srinivasan Chandrasekaran, “Structural Health Monitoring with Application to Offshore Structures”. Em: WORLD SCIENTIFIC, 2019. DOI: 10.1142/11302

22. Manfred Kreuzer, "Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors". Disponível em http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/FBG.pdf. Acesso em 17 Junho 2020

23. Martine Wevers e Kasper Lambrighs. "Applications of Acoustic Emission for SHM: A Review". Em: Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2008. DOI: 10.1002/9780470061626.shm011

24. Stelios Katsanevakis et al. "Impacts of invasive alien marine species on ecosystem services and biodiversity: a pan-European review". Em: Journal of Marine Science and Application, 2014. DOI: 10.3391/ai.2014.9.4.01

    Stelios Katsanevakis et al. «Impacts of invasive alien marine species on ecosystemservices and biodiversity: A pan-European review». Em: Aquatic Invasions (2014) Volume 9, Issue 4: 391–423, 2014. ISSN: 18185487. DOI: 10.3391/ai.2014.9.4.01

25. INEGI, Lander AMALIA, 2019

26. INEGI, Ângulo das pernas do AMALIA e altura do centro de gravidade em função das mesmas, 2019

27. INEGI, Dimensões gerais do AMALIA em função do ângulo das pernas, 2019

28. INEGI, Altura, diâmetro e altura do centro de gravidade do AMALIA em função do ângulo das pernas, $\theta$, 2019

29. J. Chambel, "Analysis of Long-Term Damage of Offshore Wind Turbine Foundations", 2019.

30. Yogang Singh et al., "CFD approach to modelling, hydrodynamic analysis and motion characteristics of a laboratory underwater glider with experimental results". Em: Journal of Ocean Engineering and Science 2.2, 2017. ISN: 24680133. DOI: 10.1016/j.joes.2017.03.003

31. Ansys Student Community, "Optimum domain size for fluid flow problems". Disponível em https://studentcommunity.ansys.com/thread/optimum-domain-size-for-fluid-flow-problems/. Acesso em 17 Junho 2020

32. CFD Online, "Calculate the wind tunnel box size". Disponível em https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/210184-calculate-wind-tunnel-box-size.html. Acesso em 17 Junho 2020

33. ANSYS, "Mesh Quality". Disponível em https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm. Acesso em 17 Junho 2020

34. Munson et al. (2009), "Fundamentals of Fluid Mechanics"(6ª edição). ISBN: 978-0470-26284-9

35. E. M. Khabakhpasheva, "Turbulent Flow". DOI: 10.1615/AtoZ.t.turbulent_flow. Disponível em http://www.thermopedia.com/content/1226/. Acesso em 18 Junho 2020

36. Autodesk Knowledge Network, "SST K-Omega Turbulence Models". Disponível em https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html. Acesso em 29 Junho 2020

37. "Drag coefficient Cd examples". Disponível em https://www.wikiwand.com/en/Drag_-coefficient. Acesso em 17 Junho 2020

38. National Aeronautics and Space Administration, "Drag of a Sphere". Disponível em https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html. Acesso em 29 Junho 2020

39. Richard G. Budynas e J. Keith Nisbett (2011), "Elementos de Máquinas de Shigley"(8ª edição). ISBN: 007-125763-2/978-007-125763-3

# ANEXO

# GRADIENTES DA PRESSÃO ESTÁTICA NAS DIFERENTES SUPERFÍCIES

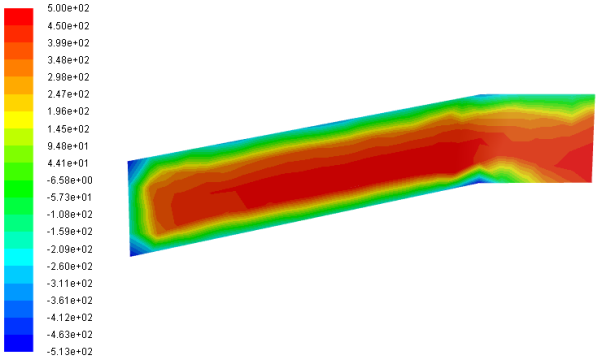



**Figura 7.1:** Valores de pressão estática no mancal (valores em Pascal)

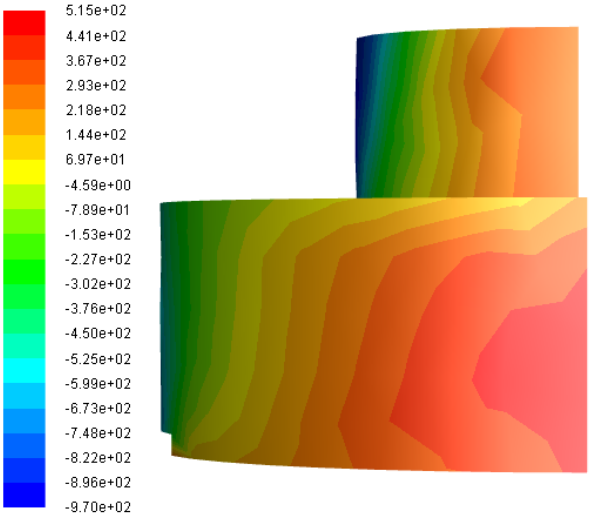



**Figura 7.2:** Valores de pressão estática na ligação entre o garfo e o mancal (valores em Pascal)

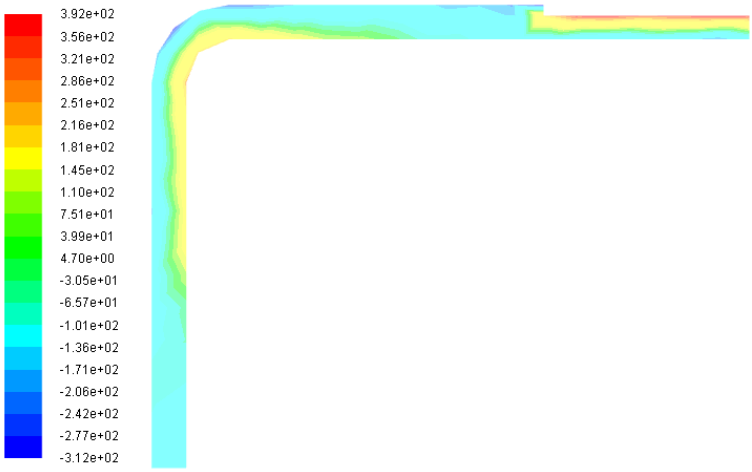



**Figura 7.3:** Valores de pressão estática no garfo (valores em Pascal)

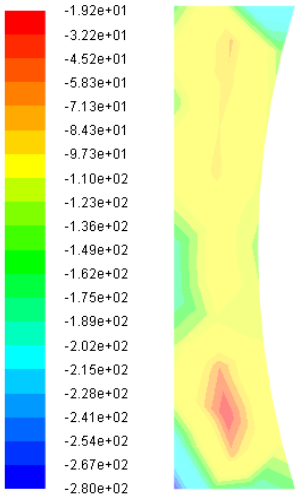



**Figura 7.4:** Valores de pressão estática nos suportes da esfera (valores em Pascal)

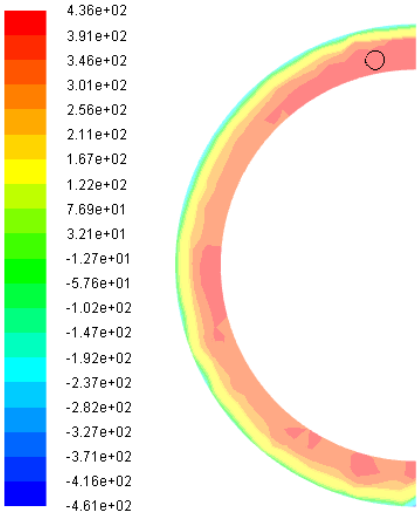



**Figura 7.5:** Valores de pressão estática nos aros (valores em Pascal)

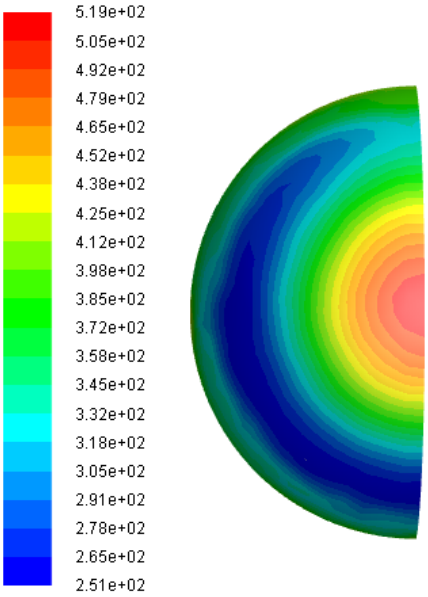



**Figura 7.6:** Valores de pressão estática na esfera (valores em Pascal)

# PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO ESTRUTURAL NO ANSYS MECHANICAL

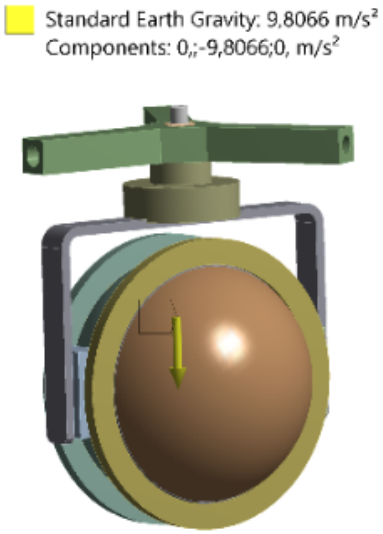



**Figura 7.7:** Força da gravidade atuante na estrutura

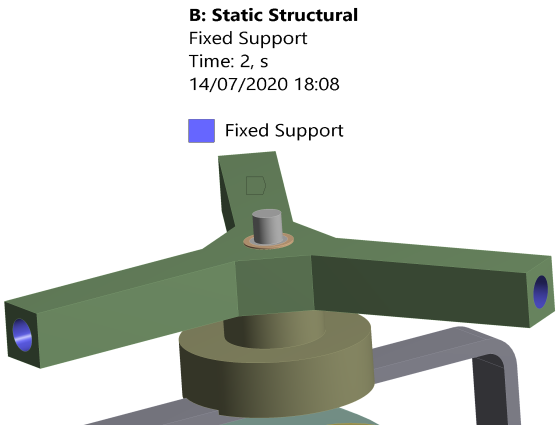



**Figura 7.8:** Apoios no mancal

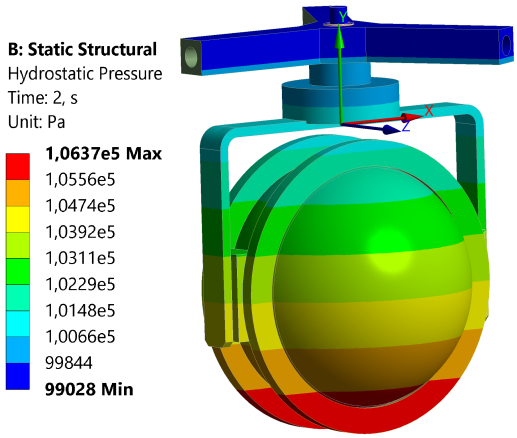



**Figura 7.9:** Pressão hidrostática atuante na estrutura

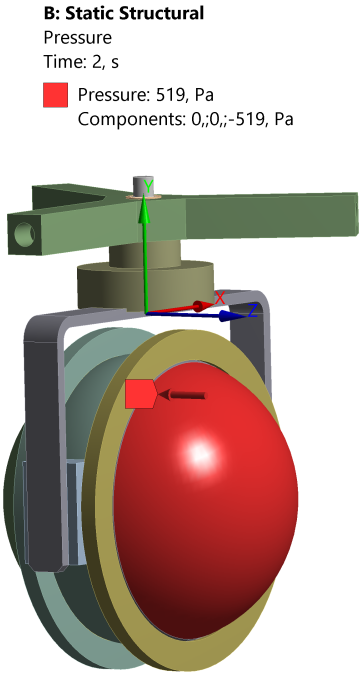



**Figura 7.10:** Pressão atuante sobre a esfera

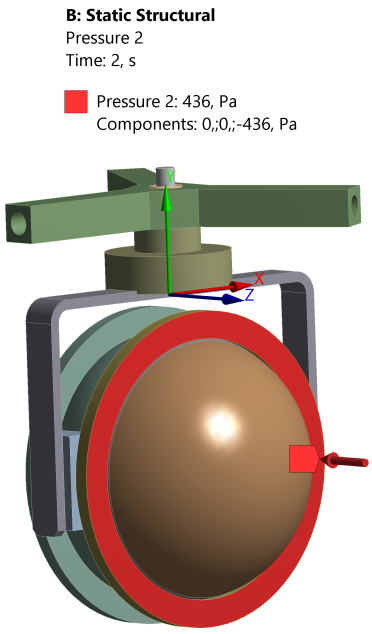



**Figura 7.11:** Pressão atuante sobre o aro

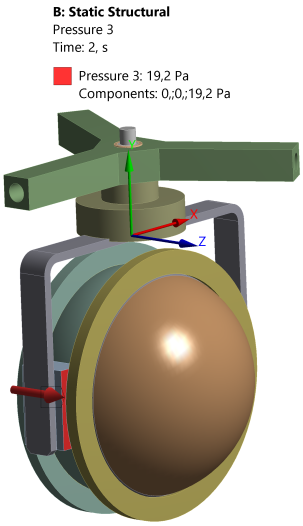



**Figura 7.12:** Pressão atuante sobre os suportes da esfera

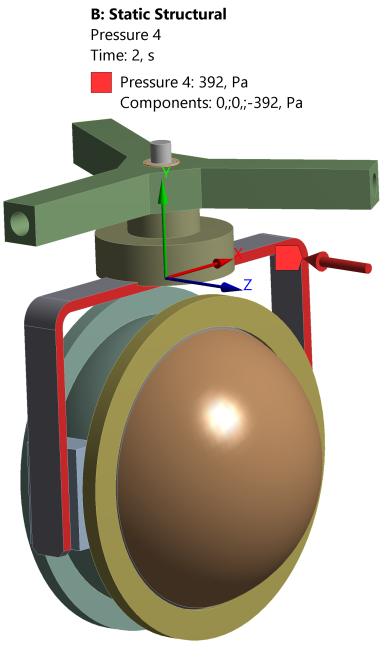



**Figura 7.13:** Pressão atuante sobre o garfo

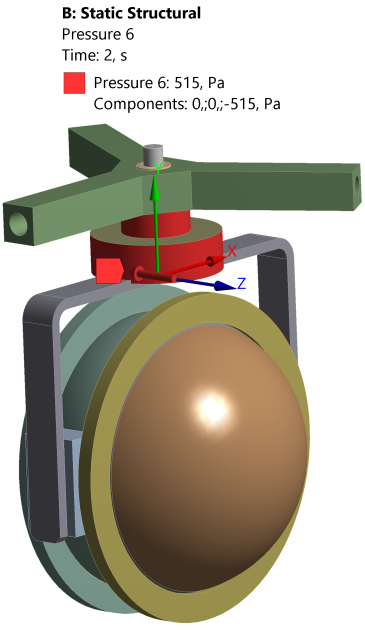



**Figura 7.14:** Pressão atuante sobre a conexão entre o garfo e o mancal

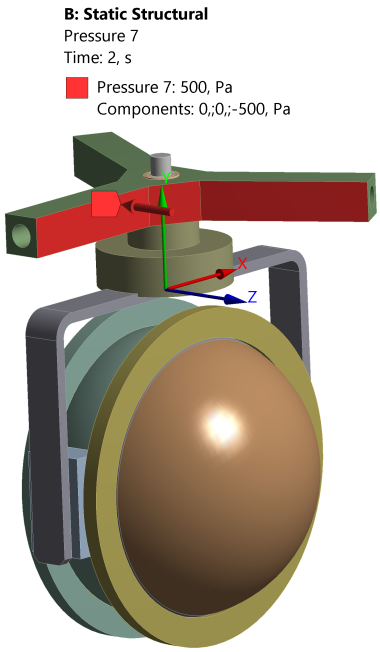



**Figura 7.15:** Pressão atuante sobre o mancal