



# ESCOLA NAVAL

ta tante de bi faire



Henrique Vieira da Silva

## Desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha dos AUVs SEACon através dos submarinos da classe *TRIDENTE*

Uma abordagem segundo a teoria Axiomática de Projeto



Alfeite  
2017





# ESCOLA NAVAL

ta sante e bi faire



**Henrique Vieira da Silva**

*Desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha de AUVs a partir dos submarinos da classe TRIDENTE.*

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenheiros Navais- Ramo de Mecânica

**Orientação de:**

**Prof. João Borges de Sousa**

**Prof. Miguel Cavique Santos**

O aluno Mestrando

O Orientador

---

Henrique Silva

---

Alfeite

2017



“O possível é obrigatório”

Papa Paulo VI



Ao meu irmão, Gonçalo



## **AGRADECIMENTOS**

Deixo escrito o meu mais profundo agradecimento a todos aqueles que contribuíram para os resultados da presente dissertação.

Ao meu orientador, Prof. João Borges de Sousa da FEUP por toda a motivação, disponibilidade e por todos os conhecimentos multidisciplinares transmitidos ao longo de todo o ano. Também agradeço ao meu co-orientador Prof. Miguel Cavique Santos pela proximidade, sinceridade e confiança demonstradas ao longo de todo o processo de trabalho. Ambos foram sempre capazes de me motivar quando o rumo parecia incerto e marcaram definitivamente os meus métodos de trabalho.

Aos oficiais da Esquadilha de Sub-Superfície particularmente ao CTEN M Henriques Frade, CTEN M Ribeiro da Paz, CTEN M Costa Lamego, CTEN EN-AEL Guerreiro Patrício, ITEN EN-AEL Tremeceiro da Paiva por toda a disponibilidade em visitar os submarinos da esquadra e esclarecer quaisquer dúvidas que foram surgindo.

Aos docentes da Escola Naval particularmente ao CFR EN-MEC Pires da Silva, Prof. Victor Sousa Lobo e Prof. Braz Fernandes pela disponibilidade em esclarecer dúvidas sobre as unidades curriculares que lecionam na Escola Naval e ao CMG M Costa Canas pelo esforço de permitir uma navegação a bordo do NRP Arpão.

Agradeço ainda ao Sr. Fernando Cruz e ao CMG EN-MEC Ribeiro Parreira do Arsenal do Alfeite, SA pelo empenho na construção do protótipo.

Aos meus camaradas de curso e de Escola Naval pela companhia de trabalho e de distrações entre trabalho que me permitiram trabalhar sempre com um sorriso no rosto. Agradeço-vos por terem ultrapassado dos limites da camaradagem até à amizade. Muito obrigado.

Por fim agradeço muito à minha família, avós, tios e primos que sempre demonstraram apoio e preocupação em todo o meu processo na Escola Naval e tão bem me acolheram nas minhas viagens de trabalho ao Porto. Aos meus pais e irmão, é com muita emoção que agradeço as diárias provas de orgulho e de amor mesmo quando não estava presente. A vocês devo tudo e agradeço muito pelo homem que sou.



## RESUMO

Os submarinos da classe *TRIDENTE* têm capacidade para que o planeamento, lançamento, operação e recolha dos *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) sejam efetuados a partir do seu interior. Contudo ainda não foram desenvolvidos os sistemas de lançamento e recolha (L/R) que o permitam efetuar sem recurso a um elemento mergulhador no exterior do navio. A solução que se apresenta com esta dissertação consiste na utilização dos tubos de lançamento de torpedos para lançar e recolher os AUVs SEACon da Marinha Portuguesa.

Deste modo, projetou-se, construiu-se e testou-se o funcionamento de um dispositivo, para assentar nos tubos de lançamento dos torpedos e ser amovível (ou seja, que não condiciona a operacionalidade dos submarinos no que toca ao seu armamento), a partir do qual os AUVs podem ser lançados para o exterior do navio em submersão.

Os sistemas de recolha dos AUVs já utilizados noutras marinhas, requerem ainda muitas alterações à estrutura ou operação dos submarinos pelo que se estudou, avaliou e propõe uma hipótese que envolva o menor número de alterações possível aos sistemas dos submarinos da classe *TRIDENTE* e que seja passível de ser implementada a curto-prazo. O estudo efetuado tem em consideração os sistemas já conhecidos e implementados noutras marinhas.

A abordagem ao projeto é feita com base na teoria Axiomática de Projeto (AP), em que são definidos os requisitos relativos a este sistema, avaliadas as várias propostas de solução dos respetivos problemas e desenvolvida a solução bem como o respetivo dimensionamento e análise com recurso a métodos computacionais e experimentais. Foram efetuadas atividades experimentais para comparar duas abordagens diferentes no que diz respeito ao funcionamento do sistema de L/R, tendo-se comprovado o funcionamento.

[Lançamento e recolha de AUVs, Axiomática de Projeto, Submarinos]



## **ABSTRACT**

Portuguese manned submarines of the *TRIDENTE* class, have the capability to launch, operate and recover Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). This is currently done with the help of divers outside the submarine. The solution developed in this work makes use of the torpedoes tubes to do the launch and recover of the Portuguese AUVs SEACon.

The aim of this work is to design, develop and test a piece that fits in the torpedoes tube and that is removable (to preserve all operation and weaponry capabilities of the submarine if AUVs are not needed).

The launch and recovery systems used in some navies require several changes in what concerns to the structure and to the operation modes of the submarine. The goal of this thesis is to study, evaluate and propose a design that makes minimum changes to the submarine's systems and it is possible to install in in short-term.

The design process used is based on the axiomatic design (AD) theory considering the functional requirements to this system and comparing the existing launch and recovery systems from other navies in order to develop a suitable solution to the Portuguese Navy needs. Thus, solution is further dimensioned and tested with computational and experimental methods. Two experiments were carried out in order to compare two different approaches to the L/R system operation.

[AUVs Launch and Recovery, Axiomatic Design, Submarines]



# ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	V
RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	IX
ÍNDICE GERAL .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES .....	XIX
LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS .....	XXI
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
1.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA .....	5
1.2. MISSÕES DESEMPENHADAS POR UUVs.....	8
1.3. AUVs SEACON.....	13
1.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS AUVs SEACON.....	15
1.3.2. REQUISITOS OPERACIONAIS DOS AUVs SEACON .....	16
1.4. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO.....	19
<b>2. ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE LANÇAMENTO E DE RECOLHA DE AUVs.....</b>	<b>23</b>
2.1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE L/R.....	23
2.2. FASES DAS MISSÕES DOS AUVs.....	23
2.2.1. AÇÕES DE MANUTENÇÃO AO AUV E AO SISTEMA DE LANÇAMENTO E RECOLHA .....	24
2.3. SISTEMAS DE LANÇAMENTO E RECOLHA DE AUVs JÁ EXISTENTES .....	25
2.3.1. SISTEMA DO FUNIL OU CONE .....	25
2.3.2. SISTEMA <i>UNIVERSAL LAUNCH AND RECOVERY MODULE (URLM)</i> .....	30
2.3.3. SISTEMA <i>TORPEDO MOUNTED RETRACTABLE ARM</i> .....	31
2.3.4. SISTEMA DE LANÇAMENTO E RECOLHA DA <i>UNIVERSITY OF NEW BRUNSWICK</i> .....	32
2.3.5. SISTEMA DE LANÇAMENTO E VIA TUBOS DE LANÇAMENTO DOS TORPEDOS.....	33
2.3.6. SISTEMA DE LANÇAMENTO E RECOLHA VIA <i>DRY/WET CASING MOUNTED HANGAR</i> .....	35
<b>3. TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO.....</b>	<b>37</b>
3.1. CONCEITOS DA TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO .....	37
3.2. APLICAÇÃO DO AXIOMA DA INDEPENDÊNCIA AOS SISTEMAS DE L/R DE AUVs .....	44
3.2.1. SISTEMA DE LANÇAMENTO <i>UNIVERSAL LAUNCH AND RECOVERY MODULE</i> .....	44
3.2.2. SISTEMA DE LANÇAMENTO VIA TUBOS DE LANÇAMENTO DOS TORPEDOS .....	45

3.2.3.	SISTEMA DE RECOLHA ATRAVÉS DE UM FUNIL OU CONE .....	46
3.2.4.	SISTEMA DE RECOLHA <i>UNIVERSAL LAUNCH AND RECOVERY MODULE</i> .....	47
3.2.5.	SISTEMA DE RECOLHA <i>BOEING TORPEDO MOUNTED RETRACTABLE ARM</i> .....	48
3.2.6.	SISTEMA DE RECOLHA SUBROV .....	49
3.2.7.	SISTEMA DE RECOLHA DA <i>UNIVERSITY OF NEW BRUNSWICK</i> .....	50
3.3.	CONCLUSÕES RETIRADAS DA APLICAÇÃO DA TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO.....	52
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>55</b>
4.1.	NECESSIDADE DA MARINHA PORTUGUESA .....	55
4.2.	CONSTRANGIMENTOS IMPOSTOS AO PROJETO .....	57
4.3.	REQUISITOS FUNCIONAIS .....	60
<b>5.</b>	<b>PROPOSTA DE SISTEMA DE LANÇAMENTO E RECOLHA .....</b>	<b>63</b>
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA MECÂNICO .....	63
5.2.	APLICAÇÃO DO PRIMEIRO AXIOMA AO PROJETO PROPOSTO.....	64
5.3.	ESTRUTURA PROPOSTA .....	68
5.4.	APRESENTAÇÃO DE UM CASO DE USO .....	71
5.5.	REFINAMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA .....	74
<b>6.</b>	<b>ANÁLISE E ESTUDOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA DE L/R PROPOSTO ..</b>	<b>81</b>
6.1.	ESTUDOS EXPERIMENTAIS DO CONCEITO PROPOSTO .....	81
6.1.1.	DESCRIÇÃO DOS DOIS PROTÓTIPOS .....	81
6.1.2.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	83
6.2.	SELEÇÃO DOS MATERIAIS A UTILIZAR NO SISTEMA DE L/R DE AUVs .....	85
6.2.1.	ESTUDO 1- MATERIAL DA PEÇA PRINCIPAL .....	85
6.2.2.	ESTUDO 2- TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE.....	90
6.3.	DIMENSIONAMENTO DA PEÇA PRINCIPAL .....	92
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
7.1.	CONCLUSÕES GERAIS .....	99
7.2.	TRABALHOS FUTUROS .....	102
7.3.	LIÇÕES APRENDIDAS .....	103
	<b>BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO A – FICHA TÉCNICA MATERIAL OBTIDO NO ESTUDO DE MATERIAIS</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE A – LISTA DE CÁLCULOS EFETUADOS EM MATHCAD.....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO PROJETO PROPOSTO.....</b>	<b>119</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Submarino Turtle.....	6
Figura 2 Submarino Resurgam .....	6
Figura 3 AUV THESEUS.....	7
Figura 4 Comunicações entre AUVs e satélites .....	10
Figura 5 AUV SEACon .....	15
Figura 6 SBS do Sistema SEACon.....	20
Figura 7 Modelo de desenvolvimento de sistemas em V .....	21
Figura 8 MBARI Docking System .....	26
Figura 9 Remus Docking System .....	26
Figura 10 Sistema Eurodoker.....	27
Figura 11 Método de aproximação ótico .....	28
Figura 12 Método de aproximação electromagnético .....	29
Figura 13 Método de imobilização Belly mounted Stinger .....	29
Figura 14 Método de imobilização Autonomous Ocean Sampling Network	
MURI.....	30
Figura 15 Universal Launch and Recovery Module (ULRM).....	31
Figura 16 Boeing Torpedo Mounted Retractable Arm.....	32
Figura 17 Projeto da Universidade de New Brunswick.....	33
Figura 18 Lançamento via tubos de lançamento de armas .....	34
Figura 19 Método de lançamento e recolha SUBROV .....	35
Figura 20 Lançamento e recolha via dry/wet casing mounted hangar .....	36
Figura 21 Domínios do projeto.....	38
Figura 22 Processo em Zig-Zag.....	38
Figura 23 Ciclo de projeto .....	39
Figura 24 Área da função densidade de probabilidade de um sistema.....	42
Figura 25 Decomposição funcional do sistema de lançamento Universal Launch	
and Recovery Module.....	45

Figura 26 Decomposição funcional do sistema de lançamento via tubos de lançamento dos torpedos .....	46
Figura 27 Decomposição funcional do sistema de recolha através de um funil ou cone.....	47
Figura 28 Decomposição funcional do sistema de recolha Universal Launch and Recovery Module.....	48
Figura 29 Decomposição funcional do sistema de recolha Boeing Torpedo Mounted Retractable Arm .....	49
Figura 30 Decomposição funcional do sistema de recolha SUBRov .....	50
Figura 31 Decomposição funcional do sistema de recolha da University of New Brunswick.....	51
Figura 32 SBS da estação de recolha.....	56
Figura 33 SBS do subsistema mecânico do sistema de L/R.....	63
Figura 34 Decomposição funcional da fase de lançamento da proposta desenvolvida .....	65
Figura 35 Decomposição funcional da fase de recolha da proposta desenvolvida .....	67
Figura 36 Vista frontal e lateral da estrutura .....	68
Figura 37 Vista frontal e lateral da peça principal.....	68
Figura 38 Forma do funil aberto .....	70
Figura 39 Garra mecânica projetada.....	71
Figura 40 Sistema de L/R proposto dentro do tubo de lançamento de armas ....	74
Figura 41 Decomposição funcional do sistema de lançamento para os submarinos.....	76
Figura 42 Decomposição funcional do sistema de recolha para os submarinos.	78
Figura 43 Sistema (em corte) proposto para os submarinos.....	80
Figura 44 Protótipo 1 .....	82
Figura 45 Protótipo 2.....	82
Figura 46 Estágio 1- escolha do material .....	89
Figura 47 Estágio 2-escolha do material .....	89
Figura 48 Estágio 3- escolha do material .....	90

Figura 49 Estágio 2- tratamento de superfície .....	91
Figura 50 Caso e restrições de fronteira aplicadas nas simulações .....	92
Figura 51 Prato utilizado na simulação para comparar com os cálculos analíticos. .....	94
Figura 52 Espessura mínima da peça em função da carga distribuída aplicada .	95
Figura 53 Simulação da carga máxima aplicada ao prato .....	96
Figura 54-Simulação da carga máxima aplicada à peça completa .....	96
Figura 55 Simulação de uma força aplicada na superfície da peça .....	97



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Características dos AUVs SEACon.....	15
Tabela 2 Equipamentos dos vários AUVs SEACon.....	16
Tabela 3 Comparação dos vários sistemas de L/R estudados com os constrangimentos impostos .....	59
Tabela 4 Requisitos funcionais de nível 1 e 2 do sistema de lançamento .....	61
Tabela 5 Requisitos funcionais de nível 1 e 2 do sistema de recolha.....	61
Tabela 6 Resultados do estudo experimental.....	83
Tabela 7 Classificação dos materiais na resistência à água salgada .....	86
Tabela 8 Comparação de resultados analíticos e computacionais .....	93



## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1.1- Erro de navegação dos AUVs SEACon. ....	18
Equação 3.1- Equação de projeto .....	39
Equação 3.2- Equação de um projeto desacoplado <b>Erro!</b>	<b>Marcador não</b>
<b>definido.40</b>	
Equação 3.3- Equação de um projeto desacoplável.....	41
Equação 3.4- Equação de um projeto acoplado.....	41
Equação 3.5 - Conteúdo de informação através da função densidade de probabilidade .....	42
Equação 3.6- Conteúdo de informação através da probabilidade.....	42
Equação 3.7- Equação de projeto do sistema de lançamento Universal Launch and Recovery Module.....	45
Equação 3.8- Equação de projeto do sistema de lançamento via tubos de lançamento dos torpedos .....	46
Equação 3.9- Equação de projeto do sistema de recolha através de um funil ou cone.....	47
Equação 3.10- Equação de projeto do sistema de recolha Universal Launch and Recovery Module .....	48
Equação 3.11-Equação de projeto do sistema de recolha Boeing Torpedo Mounted Retractable Arm .....	49
Equação 3.12-Equação de projeto do sistema de recolha SUBRov .....	50
Equação 3.13- Equação de projeto sistema de recolha da University of New Brunswick.....	51
Equação 5.1- Equação de projeto da fase de lançamento do projeto desenvolvido .....	65
Equação 5.2- Equação de projeto da fase de recolha do projeto desenvolvido..	66
Equação 5.3-Equação de projeto do sistema de lançamento para os submarinos .....	77
Equação 5.4-Equação de projeto do sistema de recolha para os submarinos .....	79
Equação 6.1- Cálculo do desvio .....	93
Equação 6.2- Cálculo da carga a considerar nas simulações.....	94



## LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AA (Arsenal do Alfeite, SA)

AD (*Axiomatic Design*)

AP (Axiomática de Projeto)

ASW (*Anti-Submarine Warfare*)

AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*)

AWG (*Anti-Warfare Group*)

CBNRE (*Chemical, Biological, Nuclear, Radiological and Explosive*)

CEMA (Chefe de Estado Maior da Armada)

CINAV (Centro de Investigação Naval)

CONOP (Conceito de Operações)

CMH (*Casing Mounted Hangar*)

CS (Constrangimentos)

DSM3 (Destacamento de Mergulhadores Sapadores nº3)

DVL (*Doppler Velocity Log*)

ESS (Esquadrilha de Sub-Superfície)

FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

GPS (*Global Positioning System*)

HVU (*High Value Unit*)

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

IMU (*Inertial Measurement Unit*)

LARS (*Launch and Recovery Systems*)

LBL (*Long Base-Line*)

LED (*Light-Emitting Diode*)

L/R (Lançamento e Recolha)

LSTS (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática)

MAST (*Marine Science and Technology Program*)

MBARI (*Monterey Bay Aquarium Research Institute*)

MEF (Método dos Elementos Finitos)

MCM (*Mine Countermeasures*)

PP (Parâmetro de Projeto)

RF (Requisito Funcional)

RINA (*Royal Institution of Naval Architects*)

RMS (*Root Mean Square*)

ROE (*Rules of Engagement*)

ROV (*Remotely Operated Vehicle*)

SAR (*Search and Rescue*)

SBS (*System Breakdown Structure*)

SEP (*Systems Engineering Process*)

SONAR (*Sound Navigation Ranging*)

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)

ULRM (*Universal Launch and Recovery Module*)

USBL (*Ultra-Short Baseline*)

UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*)

WHOI (*Woods Hole Oceanographic Institute*)

## Introdução

O tema desta dissertação surge da parceria entre o Centro de Investigação Naval (CINAV), a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a Esquadilha de Sub-Superfície (ESS) no âmbito do projeto SEACon que tem como principal objetivo conferir aos *Autonomous Underwater Vehicle* SEACon a componente operacional, necessária ao desenvolvimento dos mesmos. Este projeto vai de encontro à diretiva de planeamento da Marinha de 2017 onde o Chefe do Estado Maior da Armada (CEMA) define como um dos objetivos estratégicos da Marinha “Dinamizar a abertura da Marinha à sociedade e aos cidadãos”. A primeira linha de ação escrita no mesmo documento é “Promover, enquadrado em orientações ministeriais da defesa, ações para reforçar a cooperação da Marinha com as universidades (...) que desenvolvem atividades ligadas à defesa e ao mar, a fim de reforçar o contributo da Marinha para o desenvolvimento científico e económico do País”.

O projeto do desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha de AUVs a partir dos submarinos da classe *TRIDENTE* surgiu da necessidade de incrementar a operacionalização dos meios navais da Marinha e do desenvolvimento tecnológico dos AUVs em Portugal. Pretende-se alargar o espectro de missões dos submarinos com a capacidade de a Marinha recorrer aos veículos autónomos submersíveis para desempenhar missões sem a utilização de recursos humanos em cenários perigosos ou hostis. Com a assinatura do protocolo de parceria entre a Marinha Portuguesa e a FEUP, para o desenvolvimento de veículos autónomos considerou-se importante operar os AUVs a partir dos submarinos da classe *TRIDENTE* no sentido de aumentar a interoperabilidade entre plataformas da Marinha.

Os AUVs são submarinos não tripulados que executam missões pré-programadas sem intervenção de um operador, contribuindo assim para um acréscimo das capacidades inerentes às missões da Marinha, em missões de carácter científico como a recolha de dados oceanográficos e de carácter operacional como a guerra de minas.

A utilização dos AUVs a partir de plataformas de superfície, semi-rígidas ou botes é já um conceito bastante explorado pela Marinha Portuguesa e pelos

investigadores desta área, sendo os veículos principalmente vocacionados para esta situação. No entanto a utilização dos AUVs a partir de submarinos permite aumentar a capacidade de operação dos mesmos, possibilitando a execução de missões mais próximas de costa sem comprometimento da sua discricção.

Atualmente, o lançamento e a recolha de um AUV através dos submarinos da classe *TRIDENTE* requer um elemento mergulhador no exterior do navio que o transporta através da eclusa do submarino. A projeção de mergulhadores para o lançamento e recolha dos AUVs acrescenta preocupações de segurança do pessoal envolvido e tem como consequência gastos significativos de tempo na preparação do equipamento e *briefings* de segurança das operações de mergulho. As operações de mergulho podem também constituir uma exposição não desejada do submarino. Com o desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha dos AUVs através dos tubos de lançamento de armas, pretende-se reduzir o tempo nos preparativos destas operações, evitar a identificação do submarino e não expor os mergulhadores a perigos existentes no exterior do mesmo. Existem já implementados noutras marinhas sistemas automáticos que não recorrem a mergulhadores e não comprometem a segurança de nenhum elemento da guarnição no exterior do submarino.

As questões que se levantam sobre o tema prendem-se, principalmente, com o desenvolvimento da plataforma de lançamento e recolha dos AUVs (conceito e modo de funcionamento, encaixe e compatibilidade com os sistemas do submarino, materiais a utilizar e dimensionamento). O sistema de recolha constitui particularmente uma questão importante visto que existem vários modelos já propostos e testados mas que obrigam à implementação de sistemas adicionais no navio, podendo comprometer a sua capacidade operacional. Assim, a avaliação do sistema a propor terá de ter em conta o mínimo de alterações possíveis à estrutura, à capacidade operacional do navio e aos seus sistemas.

Deste modo, o objetivo da presente dissertação é, com recurso à teoria da axiomática de projeto (AP), estruturar conceitualmente o projeto e verificar experimentalmente o funcionamento do conceito mecânico da solução proposta de um sistema de lançamento e recolha dos AUVs SEACon para os tubos de lançamento de armas dos submarinos da classe *TRIDENTE*, cujo conceito e projeto não existe na

Marinha Portuguesa. Para tal, é importante começar por avaliar os sistemas já propostos e experimentados noutras marinhas e países e definir a problemática concretamente no caso da Marinha Portuguesa e seus meios.

No capítulo 1 é apresentada a revisão bibliográfica dos temas estudados onde consta uma introdução histórica ao uso de AUVs e são descritas as missões que podem ser desempenhadas por veículos autónomos submersíveis, em particular pelos AUVs SEACon desenvolvidos na FEUP que estão ao serviço da Marinha Portuguesa. Neste capítulo é também feito um ponto de situação da parceria entre a FEUP e a Marinha Portuguesa no que diz respeito ao projeto SEACon e é feita a descrição das metodologias de investigação utilizadas.

Seguidamente, no capítulo 2 é apresentado o estado da arte dos sistemas de lançamento e recolha de AUVs já existentes, que podem ser empregues a partir de submarinos. Estes sistemas foram desenvolvidos por universidades, laboratórios de investigação e empresas privadas com a colaboração de marinhas de alguns países,

No capítulo 3 é descrita a teoria Axiomática de Projeto e aplicado o primeiro axioma da AP com o objetivo de avaliar os sistemas de lançamento e recolha descritos no capítulo anterior com base nesta mesma teoria, de modo a comparar os projetos dos vários sistemas.

O capítulo 4 constitui a definição do problema quanto ao desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha dos AUVs SEACon a partir dos submarinos da classe *TRIDENTE*. Em primeiro lugar é descrita a necessidade do projeto por parte da Marinha Portuguesa, são enumerados os constrangimentos a ter em conta e definidos os requisitos funcionais para as fases de lançamento e recolha.

No capítulo 5 são apresentadas duas propostas de solução para o problema definido no capítulo 4. Destas duas soluções apenas a segunda é compatível com os tubos de lançamento de armas dos submarinos da classe *TRIDENTE*. Numa primeira fase é aplicado o primeiro axioma da AP e, posteriormente, é descrito o sistema proposto sob a forma de caso de uso em formato narrativo.

Por fim, no capítulo 6 são apresentados dois estudos experimentais que

comprovam conceptualmente o funcionamento do sistema proposto, é apresentado um estudo de seleção de materiais a utilizar no sistema utilizando o programa CES Edupack 2010, o desenho do sistema e respetivo dimensionamento com recurso a desenhos e simulações utilizando o método dos elementos finitos através do programa SolidWorks 2017.

O estilo de referências bibliográficas adotado na presente dissertação é o *American Psychological Association (APA)*, por escolha do autor.

A presente dissertação ultrapassa o limite de páginas definido nas normas de dissertações da Escola Naval devido ao tamanho das imagens das decomposições funcionais e das matrizes de projeto.

Um passo importante da investigação é a aceitação por parte da comunidade científica. Apesar da elaboração da dissertação de mestrado e a sua apresentação pública já constituírem uma contribuição para a área científica em estudo, a publicação e apresentação de artigos em conferências e jornais ou revistas é a exposição para a comunidade científica específica. Como tal, alguns dos resultados obtidos nos capítulos 5 e 6 da presente dissertação foram apresentados na conferência *Warship 2017: Submarines & UUVs*, da *Royal Institution of Naval Architects (RINA)*, em Bath, Reino Unido nos dias 14 e 15 de Junho de 2017 e publicados nos *Proceedings* da mesma conferência com o título “*Development of an AUV Launch and Recovery System for the Portuguese manned submarines via torpedo tubes*”. A participação nesta conferência (patrocinada pela FEUP através do protocolo celebrado entre a Escola Naval e a Universidade do Porto) permitiu ainda a oportunidade do autor ser revisor de um artigo para a *International Maritime Conference 2017* a realizar entre os dias 3 e 5 de Outubro em Sidney na Austrália, também promovida pela RINA.

# 1. Revisão Bibliográfica

## 1.1. Introdução histórica

Os *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs) são veículos submarinos não tripulados que se podem dividir, relativamente ao modo de condução, nas seguintes duas categorias: os *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) e os *Remotely Operated Vehicles* (ROVs). AUVs são veículos autónomos subaquáticos com a capacidade de navegar a partir de planeamentos de navegação pré-carregados para o sistema do veículo. Os ROVs são veículos operados remotamente, ou seja, conduzidos remotamente por um operador humano que está em constante comunicação com o veículo por intermédio de um cabo de comunicação. Através deste cabo são enviados os *inputs* ou as instruções a desempenhar pelo veículo (Inzartsev, 2009).

Uma consideração importante é a distinção entre sistemas autónomos e automáticos: autónomo significa que o sistema tem liberdade de escolha no seu comportamento mediante influências externas ao próprio sistema. Um sistema automático é um sistema que se comporta exatamente como foi programado sem ser capaz de reagir à influência de fatores externos (Clough 2002).

Os AUVs são veículos autónomos capazes de operar sem a intervenção de um operador, possuindo a sua própria energia (através de baterias), propulsão, *software* e sensores integrados, que permitem o desempenho de uma missão previamente programada.

Os veículos submersíveis são uma tecnologia militar com dois séculos. O primeiro submarino americano, batizado com o nome “*Turtle*” (figura 1) foi projetado em 1775 por dois irmãos, David e Erza Bushnell, no estado de Connecticut, Estados Unidos da América (EUA). Este submarino foi construído em forma de ovo usando madeira e incluindo chumbo nas obras vivas (parte do navio que está imersa) como elemento de estabilidade. A imersão era possível atuando num pedal, no interior do navio, que acionava uma válvula para encher os tanques de lastro; soltando o pedal eram acionadas duas bombas que ejetavam água dos tanques. A autonomia de ar era de trinta minutos apenas renovada pela abertura de uma escotilha quando o navio navegava

à superfície. A propulsão do navio na horizontal operava-se por ação de dois remos, um de cada bordo. O “*Turtle*” foi o primeiro submarino a participar numa batalha, na Batalha de *Long Island* em 1776, aquela que foi a primeira batalha após o dia 4 de julho de 1776, dia da independência dos EUA (Blidberg, 2001).

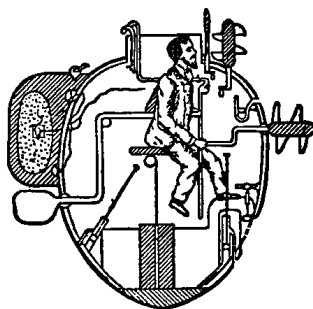


Figura 1 Submarino *Turtle*<sup>1</sup>

Só em 1879 surgiu o primeiro submarino com propulsão de turbina a vapor, o “*Resurgam*” (figura 2), depois de vários modelos movidos a ar comprimido. O navio foi desenvolvido por George Garrett no Reino Unido e tinha doze metros de comprimento e uma autonomia de submersão de dez horas (Blidberg, 2001).



Figura 2 Submarino *Resurgam*<sup>2</sup>

No século XIX foram desenvolvidos inúmeros modelos de submarinos que foram utilizados em guerra de minas e guerra submarina, assim como para fins científicos em pesquisas oceanográficas. Foi também nas últimas três décadas desse século que surgiram os primeiros torpedos, na Áustria, que podem ser considerados como primeiros AUVs (Niño & Dutra, 2010).

Foi no entanto, num passado mais recente (finais do séc. XX) que os AUVs

---

<sup>1</sup> retirado da revista *SeaFrontiers* VOL 22, nº4, pp 234 Julho e Agosto de 1976.

<sup>2</sup> retirado de 3H Consulting Ltd. [www.3hconsulting.com](http://www.3hconsulting.com).

tiveram o seu desenvolvimento tecnológico mais acentuado. Na década de 60 foram construídos alguns protótipos de AUVs com o objetivo de recolher dados sobre as características meteorológicas e oceanográficas de uma determinada área. Contudo, estes protótipos não conseguiam armazenar muitos dados devido à pouca memória dos seus sistemas eletrónicos e ainda pela dificuldade em incorporar vários sensores num só AUV, o que limitava a quantidade de variáveis em estudo (Niño & Dutra, 2010). Foi em 1960 que as marinhas dos EUA e do Canadá utilizaram o AUV “*Theseus*” (figura 3), desenvolvido pela *International Submarines Engineering Ltd*, para lançar 190 km de cabos de fibra ótica a quinhentos metros de profundidade sob o gelo.

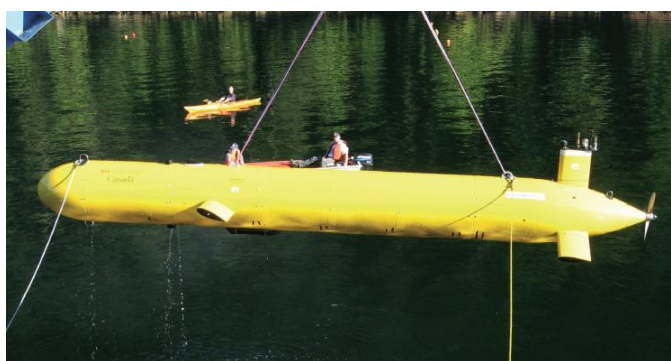


Figura 3 AUV THESEUS<sup>3</sup>

Entre 1970 e 1980, manteve-se a linha de evolução da década anterior, continuando a construir-se protótipos de AUVs. É de assinalar uma expedição ao Ártico com o objetivo de recolher dados sobre esta região da qual pouco se conhecia. Neste período foram várias as universidades e também laboratórios e institutos que investiram na construção de modelos de AUVs. Contam-se entre os primeiros a *University of Washington* e a *University of New Hampshire's* nos EUA, a *Russian Academy of Sciences* na Rússia, o *Institute of Marine Technology Problems*, o *Naval Ocean System Center* e o *Institute Français de Recherche Pour L'exploitation de La Mer* em França. Contudo, a tecnologia eletrónica não estava suficientemente desenvolvida para acompanhar o que se pensava serem as capacidades de emprego dos AUV (Blidberg, 2001).

Na década de 80, houve um avanço tecnológico acentuado na eletrónica que

---

<sup>3</sup> retirado de Autonomous Undersea Vehicles applications center [www.auvac.org](http://www.auvac.org).

permitiu desenvolver computadores capazes de suportar algoritmos de controle, que podiam operar em plataformas autónomas. É em 1980 que se realiza o primeiro “*International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*” em Durham nos EUA, surgindo a partir desta data, vários programas que disponibilizavam fundos para o desenvolvimento de protótipos.

A década de 1990 foi particularmente importante pela interação entre utilizadores e investigadores quando algumas empresas e entidades utilizadoras de AUVs (eg. empresas de exploração petrolífera) foram ao encontro das universidades e institutos que os desenvolviam. Esta interação permitiu que os AUVs passassem a preencher os requisitos operacionais apresentados pelos utilizadores.

No séc. XXI, o crescimento da produção e da comercialização dos AUVs acompanha o desenvolvimento tecnológico das baterias, sensores e *softwares* de processamento de sinal associados a esses sensores. Ainda há barreiras tecnológicas a ultrapassar, como o aumento da carga das baterias e consequentemente a autonomia dos veículos, ou o aumento da velocidade de operação. Contudo as aplicações já efetivadas e os cenários de emprego dos AUVs têm vindo a aumentar a possibilidade de extração de dados das águas em que navegam, estendendo-se à investigação de fundos oceânicos e estudos oceanográficos. São ainda cada vez mais usados em guerra de minas com mais recursos disponíveis.

## **1.2. Missões desempenhadas por UUVs**

Os UUVs têm assumido uma elevada importância e uma mais-valia para as marinhas militares devido à versatilidade das missões que podem desempenhar. O *US NAVY UUV MasterPlan* (US Navy, 2004) é o documento estratégico da Marinha Norte-Americana que descreve as principais missões que podem ser desempenhadas por UUVs e ordena-as pela ordem de preponderância apresentada de seguida.

### **1.2.1. INTEL, Vigilância e Reconhecimento (ISR)**

As missões de ISR consistem na recolha e compilação de diferentes tipos de

dados informativos: INTEL<sup>4</sup>, detecção e localização de alvos e mapeamento de fundos oceânicos desconhecidos. Os veículos autónomos, para além de permitirem enriquecer o conteúdo de INTEL sobre um determinado panorama operacional, podem também ser importantes para fornecer informações essenciais, por exemplo, para o desenrolar de missões *Mine Countermeasures (MCM)* e *Anti-submarine Warfare (ASW)*. Os UUVs são veículos indicados para missões deste tipo devido à sua capacidade autónoma de operar em águas pouco profundas e inacessíveis por parte dos submarinos, com pouca probabilidade de serem detetados. Para além das capacidades anteriormente enunciadas, mediante os sensores instalados nos veículos, os UUVs podem ainda desempenhar missões de: detecção e localização de ameaça *Chemical Biological Nuclear Radiological and Explosive (CBNRE)*, monitorização de tráfego na entrada e saída de canais e portos, depósito de sensores e compiladores de dados em ambiente subaquático e ainda na detecção e localização de objetos em fundos oceânicos.

#### 1.2.2. Ligações de comunicação e navegação

Os UUVs têm a capacidade de funcionar como ligações de comunicação e navegação, entre navios de superfície, submarinos, estações em terra e aeronaves. Inclusivamente, os UUVs têm já a capacidade de comunicar com outros tipos de veículos autónomos de superfície (McGillivray et al, 2012). O veículo pode funcionar como um intermediário no fluxo de comunicação, podendo também ser posicionado, de forma discreta, com uma antena numa área onde o objetivo seja interceptar comunicações de outras forças.

Outra função importante é a de poder atuar como ligação entre um submarino e o *Global Positioning System (GPS)* ou outro sistema de navegação via satélite, sem que a posição do submarino seja exposta, como intermediário do envio e receção de sinais entre o satélite e o submarino.

Como ajuda à navegação, os UUVs podem ser utilizados como bóias transitórias não assinaladas nas cartas náuticas, recolher dados meteorológicos ou ser uma referência visual (quando à superfície), para manobras de forças navais.

---

<sup>4</sup> Do inglês *Intelligence* que significa uma informação de carácter militar ou político reservado.

Recentemente, em Janeiro de 2017, o *Woods Hole Oceanographic Institute* (WHOI) empenhou um AUV numa missão no mar Ártico, no Canadá. Uma equipa do laboratório conseguiu estabelecer comunicações a longa distância com um satélite a partir de um AUV imerso sob camadas de gelo (figura 4).

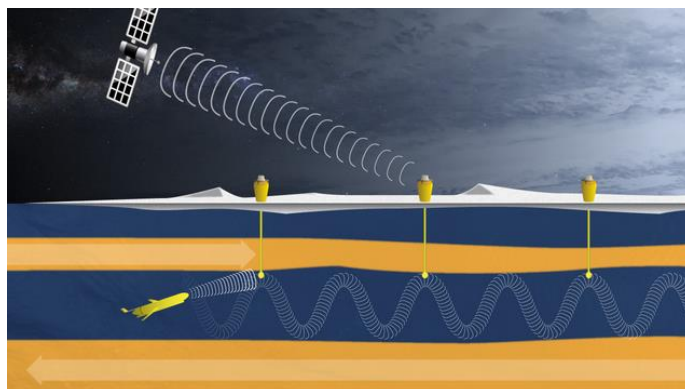


Figura 4 Comunicações entre AUVs e satélites<sup>5</sup>

### 1.2.3. Contra medida de minas ou *Mine Countermeasures* (MCM)

As contra medidas de minas surgem com a necessidade de, aquando de uma ameaça de minas numa determinada área, estabelecer uma rota ou zona de segurança para a navegação. Os trabalhos MCM contemplam quatro fases diferenciadas que podem ser executadas por UUVs:

- Reconhecimento—Deteção da mina, classificação (quanto ao tipo de explosivo, tamanho, peso) identificação (características como onde foi fabricada e por quem foi depositada) e a localização.
- Separação—Neutralização do engenho através da separação do quadro de controlo e da carga explosiva.
- Varrimento—Verificação de que não há hipóteses de o engenho detonar através de outro modo de ativação.
- Proteção— transporte do engenho para um local seguro.

Através da recolha de dados oceanográficos, meteorológicos (como vento, velocidade e direção da corrente), batimétricas (linhas que unem pontos com a mesma

---

<sup>5</sup> Retirado de <http://www.whoi.edu/oceanus/feature/communicating-under-sea-ice>. (última consulta a 29 de maio de 2017)

profundidade) e níveis de visibilidade a várias profundidades, os UUVs podem também ser utilizados para determinar zonas suscetíveis de ser minadas.

#### 1.2.4. Reabastecimento ou entrega de cargas

Os UUVs de maiores dimensões têm a capacidade de executar operações de reabastecimento no mar sem a necessidade de expor uma *High Value Unit* (HVV) como um navio reabastecedor ou logístico. As cargas a serem transportadas podem ser material a ser usado por forças especiais, sensores e outro material necessário a missões ISR, ASW e MCM, armamento e ainda mantimentos.

#### 1.2.5. Guerra anti- submarina ou *Anti-Submarine Warfare* (ASW)

No combate à ameaça submarina, existem três focos principais a ter em conta:

- “*Hold at Risk*” –Monitorização de submarinos a entrar e sair de portos ou a passar por canais ou estreitos.
- “*Maritime Shield*” –Providência de áreas de fundeadouros ou de operação de navios mercantes e de pescas seguras e safas de submarinos hostis.
- “*Protected Passage*”– Providência de áreas de trânsito, entre zonas de operação, de navios mercantes ou formaturas de navios militares seguras e sem a presença de submarinos hostis.

Destes três focos, os UUVs assumem particular importância no primeiro pelo facto das limitações de autonomia não permitirem o veículo operar sem um navio mãe em zonas mais afastadas de costa, tal como requerido no segundo e terceiro foco descrito anteriormente. Com recurso ao posicionamento estratégico de vários UUVs, torna-se possível monitorizar o tráfego de submarinos nas proximidades das entradas e saídas de portos ou estreitos, de forma discreta. Mediante as Regras de empenhamento ou *Rules of Engagement* (ROE) específicas e apropriadas, podem ser posicionados, também, UUVs com armamento para garantir a soberania destas áreas. As ROE “são regras e diretivas para forças militares que definem as circunstâncias, condições, grau e modo do uso da força em ações que o justificam” (MC 362/1 2003).

#### 1.2.6. Oceanografia

O reconhecimento de uma área de operações é fundamental no planeamento tático e estratégico de uma missão. A utilização de UUVs equipados com os sensores adequados à recolha de dados pretendida, permite ao navio obter em tempo-real ou no fim da missão do UUV informações das batimetrias, imagens do fundo oceânico, características da coluna de água e perfis de temperatura e de salinidade.

#### 1.2.7. Operações de informação<sup>6</sup>

No que diz respeito à manipulação de informação, os UUVs podem ter duas ações importantes a destacar: A injeção de contra-informação em comunicações ou redes de computadores inimigas e atrair navios inimigos para uma determinada posição.

Os UUVs de pequenas dimensões são particularmente úteis nas missões em zonas costeiras, podendo ser, também, um importante suporte à guerra eletrónica através de antenas ou transmissores instalados nos sistemas dos veículos.

#### 1.2.8. Inspeção/ identificação e busca e salvamento

No âmbito da necessidade de resposta aos atos de terrorismo, tornou-se prática comum de segurança inspecionar os cascos e obras vivas dos navios militares, por parte dos destacamentos de mergulhadores embarcados nos próprios navios, para garantir que nenhum engenho explosivo foi aí colocado. A utilização de equipas de mergulhadores tem sempre riscos associados e preparativos para operações de mergulho demoradas, pelo que o uso de UUVs é uma alternativa na execução destas missões.

Com o navio-mãe atracado, os UUVs podem ainda constituir uma resposta rápida a ameaças assimétricas. Ameaça assimétrica é definida pelo *Asymmetric Warfare Group* (AWG) do exército dos EUA como “qualquer ato bélico em que as forças atacantes são desproporcionais quantitativamente e qualitativamente às forças opositoras, constituindo assim um ataque atípico e cujas respostas defensivas não estão planeadas.” Um exemplo foi o ataque a 12 de Outubro de 2000, reivindicado pela organização terrorista *Al-Qaeda*, em que uma pequena embarcação de fibra de vidro

---

<sup>6</sup> Neste contexto, o conceito de informação não respeita a teoria Axiomática de Projecto.

com explosivos a bordo colidiu propositadamente contra um *destroyer* da Marinha dos EUA que estava atracado no porto de Áden, no Iémen. Em portos considerados hostis, os UUVs armados podem constituir uma barreira que detete qualquer aproximação excessiva e, mediante ordens e procedimentos pré-estabelecidos, aja de forma a parar o ataque.

Os UUVs, podem ainda ser empenhados em missões de *Search and Rescue* (SAR) ou busca e salvamento marítimo. Particularmente na busca de naufragos ou destroços de um acidente marítimo, com recurso aos sensores instalados no sistema dos veículos como o SONAR ou câmaras óticas.

#### 1.2.9. Ataques coordenados

A precisão no tempo em ataques coordenados por várias unidades é fundamental para o sucesso desse mesmo ataque. Os UUVs podem ser utilizados, por exemplo, no disparo remoto. A discrição e a impossibilidade de reconhecimento do navio mãe após o disparo remoto, fazem dos UUVs boas plataformas de tiro ou meios de distribuição de armamento e comunicações para a preparação de um ataque coordenado. O disparo de armas por via de UUVs permite abrir fogo de uma posição mais próxima do alvo e a movimentação do navio mãe para longe do *Datum*<sup>7</sup>, não expondo, assim, a sua posição. O uso de veículos autónomos como plataforma de tiro, não foi ainda testada com recursos subaquáticos, tendo sido testada nos *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

Na operação com UUVs a partir do submarino deverá estar previsto o emprego de regras de empenhamento ROEs. Estas regras são definidas pelo comando estratégico da missão em que os meios estão empenhados.

### 1.3. AUVs SEACon

Os AUVs SEACon são veículos autónomos subaquáticos desenvolvidos pelo Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS) da FEUP para a Marinha Portuguesa. Os veículos são operados pelo Destacamento de mergulhadores Sapadores nº 3 (DMS3) da Marinha Portuguesa. O DMS3 tem a responsabilidade de operação dos

---

<sup>7</sup> Última posição conhecida de um submarino ou um suspeito submarino após ter sido perdido o contacto sonar. (APP7(D), 2007)

AUVs devido à natureza das missões que desempenha, das quais se destacam as seguintes e que é possível recorrer a AUVs como elemento de apoio:

- Reconhecer e inativar engenhos explosivos convencionais ou improvisados, na área de responsabilidade da Marinha;
- Coordenar, dirigir e executar operações de salvamento marítimo, designadamente a recuperação de navios ou objetos no fundo do mar.
- Participar em operações de salvamento de náufragos, recuperação de embarcações e na realização de pequenas reparações nas obras vivas dos navios da Marinha Portuguesa;
- Apoiar, na sua área de especialidade, os serviços de Proteção Civil em situações de catástrofe, calamidade ou acidente em que os seus serviços sejam requeridos.
- Colaborar com as entidades responsáveis na fiscalização das atividades económicas ligadas à exploração do leito do mar e do subsolo marinho e à defesa do património subaquático.
- Colaborar com as entidades responsáveis na repressão de atividades ilícitas no combate ao tráfico de estupefacientes (nomeadamente na utilização dos fundos como meio para mascarar tráfico de narcóticos e de armas).
- Colaborar com as entidades responsáveis no estudo científico do meio aquático, nomeadamente no campo da hidrografia e da oceanografia e do leito e subsolo do mar e dos rios.
- Efetuar buscas, análise e limpeza de fundos a canais de acesso a locais de desembarque em apoio às operações anfíbias, entre as águas muito pouco profundas e as águas pouco profundas.

As intervenções nos AUVs estão a cargo do mesmo destacamento em conjunto com o LSTS da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP. No âmbito do projeto SEACon, foram entregues três veículos à Marinha Portuguesa, dos quais o SEACon-3 foi equipado com sensores mais adequados à recolha do AUV em estações submarinas (como por exemplo os submarinos da classe *TRIDENTE*). No entanto, ainda não foi desenvolvido nenhum sistema adequado nem foram efetuados testes de aproximação.

De acordo com as missões que os AUVs podem desempenhar no contexto militar e civil, os AUVs SEACon, estão preparados para ser projetados em missões MCM, apoio na busca e salvamento marítimo, monitorização de objetos no fundo do mar e em missões de carácter científico como pesquisas oceanográficas e mapeamento de fundos oceânicos.

### 1.3.1. Características dos AUVs SEACon

Os AUVs SEACon (figura 5) são veículos automáticos cilíndricos, com a forma de torpedo, constituídos por três secções: secção frontal, central e secção da cauda. As três secções têm uma arquitetura aberta, o que permite separá-las e integrar vários sensores, mediante a missão a desempenhar, na secção mais conveniente.



Figura 5 AUV SEACon

As características dos AUVs SEACon estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 Características dos AUVs SEACon

Comprimento do cilindro	1,10 m
Diâmetro do cilindro	0,15 m
Peso	15 a 22 kg
Velocidade máxima	4 nós
Profundidade máxima de operação	100 m
Autonomia a 3 nós	8 h

Os AUVs SEACon podem ser equipados com diversos equipamentos e sensores mediante as missões que se pretenda que desempenhem. Neste momento, os três veículos autónomos estão equipados com os equipamentos de navegação e comunicação presentes na tabela 2.

Tabela 2 Equipamentos dos vários AUVs SEACon

AUV	Seacon 1	Seacon 2	Seacon 3
Sensores	SSS Imaginex 330/770kHz (Sonar)	SSS Imaginex 330/770kHz (Sonar)	SSS Klein (Sonar)
	Camara fotográfica	Multibeam- DeltaT (Sonar multifeixe)	DVL (Doppler Velocity Log) – aparelho medidor de correntes e outros dados
Navegação	IMU (Inertial Measurment Unit) - sistema de navegação inercial	LBL (Long base-line) – transponder acústico	IMU (Inertial Measurment Unit) - sistema de navegação inercial
	GPS –sistema de navegação por satélite	GPS–sistema de navegação por satélite	GPS–sistema de navegação por satélite

Um aspeto importante no projeto é o modo como é ativada a sua propulsão. O comando de início da missão pré-carregada e da navegação do veículo pode ser dado de dois modos diferentes:

- Via comunicações *wireless* enviadas por um operador que pode estar dentro do submarino;
- Via um íman em contacto com um recíproco colocado previamente no interior veículo autónomo que, quando interrompido o contacto, ativa a propulsão do veículo e quando conectado é desativada.

### 1.3.2. Requisitos operacionais dos AUVs SEACon

O submarino pode lançar e recolher AUVs em três estados de navegação diferentes: A navegar à cota periscópica (15 metros de profundidade), em imersão profunda (profundidade inferior a 15 metros) ou em assentamento no fundo. A escolha do estado de navegação depende das condições metereológicas, do tipo e morfologia do

fundo e fatores de ameaça considerados na missão.

O lançamento de torpedos e minas não tem qualquer limitação de condições meteoceanográficas numa situação real. Contudo, em treino, a Marinha adota condições de lançamento específicas pelo facto de os torpedos serem recolhidos posteriormente e esse trabalho não poder ser efetuado com quaisquer condições meteorológicas e oceanográficas.

Devido às suas dimensões, o AUV é mais influenciado pelas condições meteoceanográficas do que o submarino e do que o torpedo, com maior incidência a baixas profundidades e à superfície. Considerando, por exemplo, um estado de mar alteroso (ondulação entre 4 a 6 metros), o submarino pode ser influenciado pela ondulação até algumas dezenas de metros de profundidade, sendo desaconselhada a sua operação a uma cota inferior a 15 metros. Quanto ao AUV, visto que a sua profundidade máxima de operação (100 metros de profundidade é inferior à do submarino), o estado do mar em que a operação tem sucesso é também diferente da do submarino. Considerando um estado de mar cavado (ondulação entre 1,25 e 2,50 metros), a operação do AUV está condicionada quando à superfície, sendo aconselhada a operação com segurança a partir dos 10 metros de profundidade.

O vento tem influência apenas quando o AUV está a realizar operações à superfície, atuando principalmente na agitação marítima (ondulação e vaga) e também nas correntes marítimas.

Tendo em conta a influência das correntes marítimas (de superfície e submarinas) na operação das duas plataformas, o AUV apresenta um comportamento menos estável devido à sua reduzida dimensão e velocidade. Assim sendo, a sua operação não deve ser considerada em ambientes com corrente superior a 3 nós, pois reduz a sua eficácia, e aumenta também a dificuldade do processo de recolha. Quanto ao submarino, este possui um sistema de regulação do caimento e do peso que lhe confere bastante estabilidade na cota de operação, reduzindo os efeitos da corrente.

Os parâmetros da água como a temperatura, a salinidade e a densidade podem influenciar a operação, principalmente quando ocorrem alterações bruscas e acentuadas.

Estas alterações podem influenciar tanto a navegação do AUV, como a recolha dos dados. Estes fatores são também preponderantes nas correntes submarinas pois quanto menor é a temperatura da água do mar, maior a densidade o que provoca um movimento no sentido da maior profundidade e, por conseguinte, massas de água com uma temperatura superior sobem gerando-se uma corrente de convecção. Em relação ao submarino, as diferenças de densidade influenciam bastante o controlo da cota podendo provocar alterações bruscas e variações acentuadas da pressão da coluna de água.

Devem ser consideradas as correntes de maré, tendo em conta a enchente e a vazante. A operação com o AUV é efetuada privilegiadamente durante o dia, para facilitar a deteção da sua posição em caso de falha, por parte de mergulhadores que sejam empenhados na recolha. Operacionalmente, em profundidades reduzidas, pode considerar-se o seu empenhamento no arco noturno, devido à discricção da operação.

Os AUVs SEACon, apesar de autónomos, apresentam um erro de navegação ( $\varepsilon$ ) que pode ser calculado, em metros, através da equação 1.1 e que deve ser tida em consideração na navegação do submarino até ao ponto *Rendez-Vous* (Azevedo 2013).

$$\varepsilon \cong U \times \left( S \times \frac{t^2}{2} + S_0 \times t \right) \times 3600 \text{ (Eq. 1.1)}$$

em que:

- $U$  é a velocidade do veiculo (m/s);
- $S$  é o erro do *Inertial Measurement Unit* (IMU) (radianos/s) (no caso do AUV SEACon é  $4,72 \times 10^{-6}$ );
- $S_0$  é o erro inicial de proa (radianos);
- $t$  é o tempo (horas);
- 3600 é o fator de conversão de horas para segundos.

Por exemplo, se o AUV navegar uma hora a uma velocidade média de 2 nós (1,03 m/s) com  $S_0 = 1^0$ , o erro seria de posição seria de 63 m.

#### 1.4. Metodologia de investigação

Existem várias abordagens e metodologias de investigação ao processo de engenharia de sistemas e ao projeto. A metodologia de investigação utilizada na presente dissertação baseia-se nas definições e conceitos da *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) Standard 1220-2005, pelo facto dos estudos e investigações dos vários componentes do projeto SEACon terem sido desenvolvidos com recurso a esta norma.

Segundo a IEEE Standard 1220-2005, sistema é definido como o conjunto de elementos e processos cujo comportamento satisfaz as necessidades do cliente/operacionais, fornecendo os produtos de sustentação ao ciclo de vida. Os sistemas são decompostos em subsistemas de acordo com a complexidade dos componentes que o constituem. Para facilitar a representação de um sistema é comum utilizar-se *System Breakdown Structure* (SBS), que é uma relação hierárquica de elementos, de processos e de recursos humanos necessários para formar uma equipa de trabalho, realizar análises técnicas e mobilizar os recursos materiais e financeiros em prol do objetivo definido (IEEE Std 1220-2005).

Na mesma referência, engenharia de sistemas é definida como o conjunto de tarefas interdisciplinares necessárias para definir o ciclo de vida de um sistema de modo a transformar as necessidades do cliente, requisitos funcionais e constrangimentos numa solução (IEEE Std 1220-2005). Assim, os sistemas podem ser definidos através de duas abordagens diferentes: sistemas para os quais existem precedentes (de onde se podem inferir princípios orientadores para novos projetos) e sistemas para os quais não existem precedentes. Não havendo precedentes para o conceito do sistema, este deverá criar e avaliar conceitos alternativos de acordo com os parâmetros de satisfação de requisitos e de risco.

No ano de 2013 foi elaborada uma dissertação de mestrado sobre o conceito de operação (CONOP) dos AUVs SEACon. Neste estudo foram abordados os conceitos de lançamento e recolha a partir dos submarinos e foram caracterizados, como plataformas independentes, os submarinos da classe *TRIDENTE* e os AUVs SEACon como subsistemas integrantes definidos no sistema do projeto SEACon (figura 6). Os

processos associados ao sistema contêm os requisitos do sistema SEACon (utilizando a norma IEEE Std 1220-2005) e a análise tanto dos requisitos dos submarinos da classe *TRIDENTE* como dos veículos autónomos para definir o CONOP.

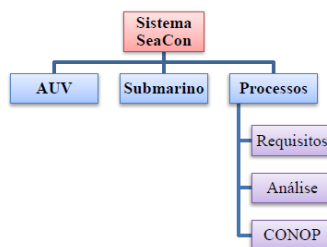


Figura 6 SBS do Sistema SEACon<sup>8</sup>

No que diz respeito ao desenvolvimento de um sistema de lançamento e de recolha não existe nenhum precedente deste âmbito na Marinha Portuguesa. Assim, utilizando a nomenclatura da AP, serão estudados os requisitos funcionais, constrangimentos e parâmetros de projeto de sistemas semelhantes já existentes noutras marinhas e noutras aplicações operacionais desenvolvidos por empresas privadas ou gabinetes de investigação universitários.

O conjunto dos vários subsistemas quando interligados, permite o funcionamento do sistema que compõem. No caso do sistema de lançamento e recolha de AUVs a partir dos submarinos, no nível mais alto do projeto existe o submarino e o veículo como um sistema só. No entanto, para que o sistema realmente funcione, devem existir processos de comunicação entre ambas as plataformas de modo a conseguir alcançar com sucesso o lançamento, a operação da missão planeada para o veículo e a recolha. As fases de lançamento e recolha pressupõem requisitos funcionais diferentes para cada uma delas e como tal projetos distintos que podem funcionar num sistema só.

Para descrever o sistema serão utilizados casos de uso. Os casos de uso descrevem o funcionamento do sistema, subsistema ou componente através de uma sequência de mensagens ou interações entre o sistema e as suas partes (intervenientes humanos, sistemas computacionais ou processos entre estes). Podem ser apresentados narrativamente ou sob a forma de diagrama (Rumbaugh, Jacobson Booch, 2005).

---

<sup>8</sup> Retirada de Azevedo, 2013.

A IEEE Std. 1220-2005 não preconiza nenhum modelo de desenvolvimento de projeto de engenharia específico, suportando vários modelos de desenvolvimento como por exemplo o modelo em V também conhecido por *Validation & Verification* (figura 7). A verificação é a avaliação da consistência de um sistema em relação à sua especificação e cumprimento dos requisitos definidos, enquanto que validação é a determinação da precisão do modelo utilizado em comparação com um outro modelo preferencialmente testado em condições reais de funcionamento (Sargent, 1988).

Este modelo preconiza diversas fases essenciais do desenvolvimento de um sistema sendo que só é possível avançar para a fase seguinte de desenvolvimento quando a anterior estiver concluída e validada. A validação dos resultados é necessária ao desenvolvimento dos vários subsistemas independentes facilitando a deteção de erros ou imperfeições indesejadas por fases, poupando assim tempo na revisão do projeto e na sua validação final. O método em V começa por definir os requisitos funcionais, depois a fase criativa do projeto e o desenvolvimento físico do sistema. Após o desenvolvimento dos subsistemas, são efetuados testes progressivamente desde os sistemas de nível inferior até aos de nível superior. O conceito deste método consiste na inversão das fases de conceção para a fase de teste, ou seja, o sistema é desenvolvido desde níveis superiores até aos inferiores e é testado desde os níveis inferiores até aos superiores (Kar and Bailey, 1996).

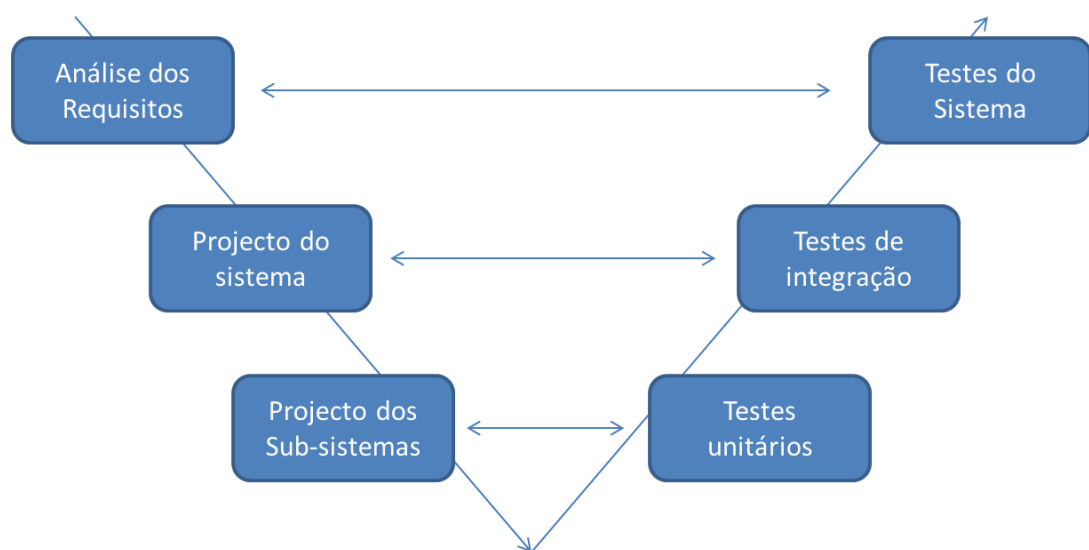


Figura 7 Modelo de desenvolvimento de sistemas em V

A teoria Axiomática de Projeto (AP) é compatível com a IEEE Std. 1220-2005, ao nível de conceção mais elevado, sendo usada neste trabalho como teoria para a fase de desenvolvimento de cada nível de decomposição funcional e físico. Esta teoria define o projeto como a relação entre os requisitos funcionais (RF) e os parâmetros de projeto (PP), desenvolvida em permanente ligação entre os RFs e os PPs num processo hierárquico de ziguezague entre eles. A cada nível de desenvolvimento, designado por nível de decomposição, a AP permite avaliar a qualidade do projeto, identificar possíveis mau-funcionamento e escolher entre várias alternativas o melhor projeto.

Esta teoria, que será abordada no capítulo 3, será aplicada na definição dos requisitos funcionais, na criação de parâmetros de projeto e na validação analítica dos vários subsistemas que constituem o sistema a projetar (primeiro passo do modelo em V). O projeto do sistema e dos subsistemas (segundo e terceiro passo do modelo em V) é o resultado do processo criativo também da teoria Axiomática de Projeto através dos PPs que satisfazem os RFs. A presente dissertação não aplica os testes (segunda parte do modelo em V) aos subsistemas, de integração e ao sistema, fazendo apenas a validação dos requisitos funcionais e das fases de projeto que o permitem (escolha de materiais e dimensionamento) e a verificação conceptual do sistema proposto através da atividade experimental realizada.

## **2. Estado da Arte dos Sistemas de Lançamento e de Recolha de AUVs**

### **2.1. Introdução aos sistemas de L/R**

Existem sistemas de lançamento e recolha de AUVs desenvolvidos para navios de superfície, para submarinos e sistemas fixos para fundos marítimos. Os sistemas através de navios ou plataformas de superfície constituem os mais comuns e mais utilizados nos dias de hoje. Para o caso de AUVs de pequenas dimensões, o lançamento pode ser efetuado através de operadores humanos num bote ou lancha semi-rígida.

A vantagem de utilização de submarinos como plataforma de recolha e operação dos AUVs em relação a plataformas de superfície é a difícil deteção dos submarinos. Em ambos os casos, os sistemas de lançamento e recolha permitem o aumento do tempo de permanência do AUV em missão, caso este seja recolhido para o interior do navio e possam ser efetuadas ações de manutenção como a recarga de baterias. Utilizando estes sistemas de recolha torna-se possível também atualizar instruções e objetivos de missão, atualizar as rotas de navegação pretendidas e descarregar, para análise, os dados já recolhidos.

### **2.2. Fases das missões dos AUVs**

O sistema de lançamento e recolha de AUVs é normalmente constituído por um berço que suporta o veículo, dos circuitos de comunicação, pelo *software* instalado no veículo, que inclui uma implementação de um algoritmo de aproximação e imobilização do veículo. As missões dos AUVs contemplam cinco fases distintas: a preparação da missão, o lançamento do AUV, a operação, a recolha de AUV e as ações de manutenção (Vanderberg, 2010).

A preparação para a missão contempla principalmente a equipagem do AUV com os sensores necessários ao desempenho da missão com sucesso e a preparação do espaço físico de lançamento e recolha do veículo.

O lançamento do AUV constitui a colocação do veículo no exterior do submarino para que possa desempenhar a missão desejada. O lançamento contempla a

etapa de ativação da propulsão do veículo e da separação física entre o veículo e o submarino ou o sistema de L/R.

A operação do AUV é o período de tempo em que o AUV está fora da estação de lançamento e recolha a desempenhar a missão atribuída e a recolher dados através dos sensores. É também nesta fase que se iniciam os preparativos para a recolha do veículo a bordo do submarino.

Na fase de recolha existem três etapas fundamentais: a aproximação entre o AUV e plataforma de recolha, a “captura” e a imobilização do AUV. Na etapa da aproximação, o AUV inicia a navegação rumo à estação de recolha através de um plano de navegação pré-definido e da navegação sobre *Waypoints*. *Waypoints* são os pontos intermédios, de partida e chegada de uma rota de navegação (Instituto Hidrográfico, 1981). A partir de uma determinada posição ou distância à plataforma de recolha pré-definida (posição *rendez-vous*), o veículo começa a receber um sinal acústico ou ótico da estação para se alinhar em direção com a entrada. Depois, o AUV inicia uma fase de aproximação a partir de posições enviadas pela estação de recolha em curtos intervalos de tempo, de modo a minimizar os erros de posicionamento. É nesta etapa que, a influência dos fatores meteorológicos e oceanográficos é mais preocupante para os operadores do sistema. A etapa de captura é o contacto físico entre o AUV e o submarino. Por fim, a etapa de imobilização representa a ligação que mantém o AUV como integrante do submarino durante a restante missão atribuída.

### **2.2.1. Ações de manutenção ao AUV e ao sistema de lançamento e recolha**

O conceito de manutenção é definido na norma portuguesa NP-EN13306 – Terminologia da manutenção como: “A combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”. Deste modo, são exemplos de ações de manutenção ao veículo a recarga de baterias, a verificação da capacidade de armazenamento de dados e a substituição de peças danificadas ou cuja substituição está prevista no planeamento de manutenção.

### 2.3. Sistemas de lançamento e recolha de AUVs já existentes

São em seguida apresentados diversos sistemas de lançamento e recolha de AUVs quer fixos ao fundo quer a partir de submarinos bem como sistemas de aproximação à estação de recolha e sistemas de imobilização do AUV. Os preparativos da missão e as ações de manutenção são específicas para cada AUV e não são mencionados neste capítulo para evitar a exaustiva descrição dos sistemas.

#### 2.3.1. Sistema do funil ou cone

Os sistemas que são descritos neste ponto não estão implementados em submarinos, podendo porém ser adaptados conceptualmente a sistemas de lançamento e recolha de AUVs através de submarinos.

O *Monterey Bay Aquarium Research Institute* (MBARI), na Califórnia concebeu um sistema de recolha fixo que consiste num funil, permanentemente aberto, em fibra de vidro com um diâmetro de dois metros e um tubo que serve de berço ao AUV (figura 8). A aproximação a este sistema é efetuada por via acústica através de um Ultra-short baseline (USBL) que, por ser acústico, tem o inconveniente de permitir a deteção da posição do sistema de recolha por parte de submarinos hostis. Para sair do sistema o AUV inverte o hélice e sai com marcha a ré.

Um outro sistema com a forma de funil ou cone (figura 9), foi desenvolvido pelo WHOI. Neste sistema, o AUV navega até à posição de recolha através do SONAR do veículo ou de um USBL que está fixo ao ponto de recolha. O funil permanentemente aberto, constituído por tubos de polietileno, encaminha o veículo para uma destas vias de entrada no sistema de recolha. No desenvolvimento deste sistema foi também criado um algoritmo para o processo de aproximação ao funil ou cone e para a recolha e imobilização. O algoritmo desenvolvido utiliza a navegação através de *waypoints* e técnicas para diminuir o *cross-track error*<sup>9</sup>. O algoritmo prevê a aproximação do veículo a 50 metros da plataforma de recolha. Atingindo esta posição, o veículo inicia a recolha com recurso a equipamentos como o *transponder* ou sistemas de

---

<sup>9</sup> Menor distância entre o ponto em que o veículo se encontra e a linha do planeamento de navegação entre o ponto de origem e o ponto de chegada ou entre dois *Waypoints*.

auxílio à navegação como o SONAR (Stokey, 2001). O *transponder* acústico emite um sinal acústico de frequência conhecida em intervalos de tempo também conhecidos, sendo deste modo fácil seguir a direção do sinal e saber a distância a que se encontra este emissor (Sousa & Pereira, 2002). No fim da pernada, o AUV deve navegar em linha reta com a mesma velocidade durante 15 segundos e estará garantida a entrada no funil ou cone (Braga 2010). O sistema está preso a um cabo ligado a uma bóia permitindo a comunicação constante com a superfície. O carregamento de baterias e descarga de dados é efetuada através de dois grampos, acionados por um motor, que permitem a passagem de dados. A saída do AUV, à semelhança do *MBARI Docking Station*, procede-se através da inversão do hélice do AUV.

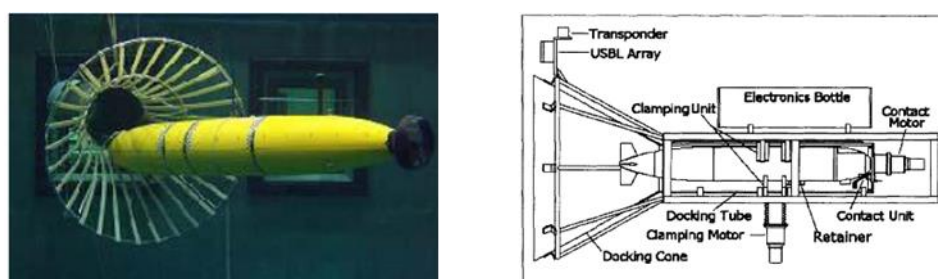


Figura 8 *MBARI Docking System*<sup>10</sup>

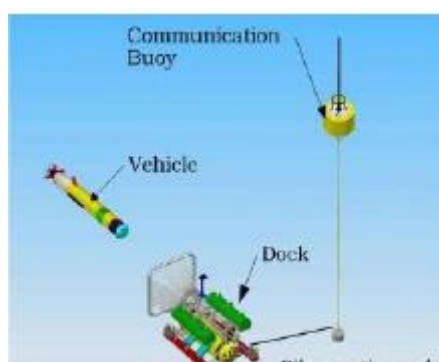


Figura 9 *Remus Docking System*<sup>11</sup>

Na Europa, a comissão europeia criou o programa *Eurodocker* (Figura 10) em 1998, através do *Marine Science and Technology Program (MAST)*, com o objetivo de criar um hangar de docagem, semelhante aos anteriormente descritos, que fosse universal para qualquer AUV. Foram projetados dois destes sistemas em que um

<sup>10</sup> retirado de Fedor, 2009.

<sup>11</sup> retirado de Braga, 2010

funciona em permanência num fundo oceânico e o outro pode ser instalado num navio de superfície de apoio às operações do AUV a ser utilizado (Hardy & Barlow, 2008).

As principais vantagens destes sistemas são o facto de permitir o lançamento e recolha de AUVs de grandes dimensões, desde que o módulo seja de dimensões apropriadas; permitir o transporte do AUV num ambiente seco e seguro; permitir ações de manutenção do AUV; permitir, desde que o encaixe seja universal, a utilização de módulos de vários tamanhos e, conseqüentemente, o transporte de diferentes AUVs que sejam os mais apropriados à missão designada. As principais desvantagens são que, quando inundado, o módulo se torna muito pesado, podendo afetar a estabilidade do navio; o sistema requer vários subsistemas complexos provenientes do navio, que resultam em muitas alterações estruturais e conceptuais do mesmo; pode necessitar da intervenção de mergulhadores no exterior do submarino, o que dependendo das ameaças identificadas poderá comprometer a segurança de vidas humanas. Além disso, não permite o transporte do AUV de forma furtiva, ou seja, é fácil identificar que o navio transporta o módulo no seu exterior (Wirtz, Hildebrandt & Gauding, 2012).



Figura 10 Sistema *Eurodocking*<sup>12</sup>

Foi ainda desenvolvida uma alternativa ao sistema de aproximação acústico do AUV com recurso a uma câmara ótica que segue um foco de luz instalado no funil, que está representado na figura 11 (Cowen et al, 1997). A desvantagem deste método é que em operações de recolha pouco profundas a câmara deteta um “falso eco” devido à luz solar refratada na superfície da água. Em 2009 foi apresentado um trabalho semelhante por um grupo de investigadores Sul-Coreanos do *Humanoid Robot Research Center* e

<sup>12</sup> Retirado de [www.thinkdefence.co.uk](http://www.thinkdefence.co.uk) (última consulta a 06 de janeiro de 2017)

do *Ocean Engineering Research Department* (Park et al 2009). Este trabalho apresenta um funil ou cone com cinco luzes *Light Emitting Diode* (LED) que guiam o veículo na sua aproximação ao berço segundo um algoritmo desenvolvido pelo grupo de investigadores. Nos testes efetuados a este sistema com sucesso, o AUV não foi colocado alinhado com o funil. O veículo possui uma câmara ótica que ao detetar as luzes nas marcações predefinidas, se aproxima do sistema de recolha.

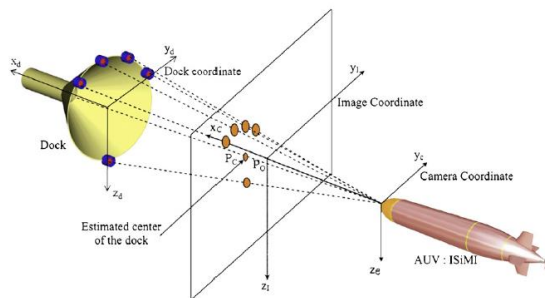


Figura 11 Método de aproximação ótico<sup>13</sup>

As vantagens deste sistema são a sua simplicidade, o baixo custo, o facto de o submarino não necessitar de navegar com velocidade nula para a recolha e a não utilização de sistemas acústicos que possam denunciar a posição das operações. Este sistema foi testado na marinha norte-americana em 2005 nos submarinos da classe *Ohio*. Nesta classe de submarinos, o funil ou cone foi testado num *dry casing mounted hangar* (que será mencionado mais à frente neste capítulo) localizado no convés do submarino. As desvantagens deste sistema são o facto de não permitir a aproximação omnidirecional do veículo, o facto de ainda não ter sido validado com a influência de correntes marítimas (Fedor 2009) e a dificuldade de deteção da luz por parte de AUVs em águas muito profundas (Maurelli, 2009).

Outro método de aproximação do veículo ao sistema de recolha é o *ElectroMagnetic Homing System* (figura 12). Este projeto desenvolvido em 1997 por um grupo de investigadores da *North Carolina State University*, consiste num sistema de recolha de AUVs utilizando um campo eletromagnético, gerado por bobines, que guia o veículo para o berço através de um cone ou funil. Testes realizados demonstram que o erro na posição do AUV durante a aproximação ao sistema é inferior a 20

<sup>13</sup> Retirado de Park et al, 2009.

centímetros e que os fenómenos oceanográficos como as correntes não afetam as linhas do campo magnético gerado. Contudo nesses mesmos testes, concluiu-se que quando o AUV inicia a aproximação com a proa desfasada mais de 30 graus do eixo do funil, ao entrar no campo magnético navega com esse mesmo desfasamento e falha a entrada. As desvantagens deste sistema são que o alcance do campo magnético não excede os 30 metros e que não existe qualquer comunicação entre o veículo e o sistema de recolha (Feezor et al, 1997).

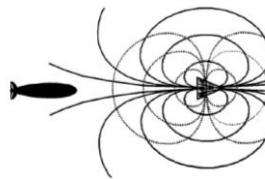


Figura 12 Método de aproximação electromagnético<sup>14</sup>

Para imobilizar e fixar o AUV ao sistema de recolha pode utilizar-se o *Belly mounted Stinger* (figura 13). Este método, desenvolvido pela *Florida Atlantic University*, é um sistema de L/R em fundos oceânicos costeiros podendo, no entanto, ser aplicado a outros sistemas. O sistema de imobilização do veículo é acionado por um sensor e consiste num sistema de tesouras, em pétalas, que permitem prender o veículo vindo de qualquer direção. As desvantagens deste método são que pequenos desvios no rumo do AUV não permitem a ação das tesouras com sucesso (Fedor 2009).

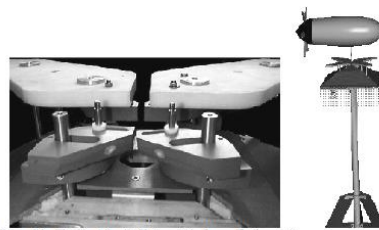


Figura 13 Método de imobilização *Belly mounted Stinger*<sup>15</sup>

Outra hipótese é a utilização de uma garra mecânica ou eletromecânica que pode ser atuada por um sensor de movimento ou de posição. A garra, respeitando o diâmetro

---

<sup>14</sup> Retirado de Feezor et al, 1997.

<sup>15</sup> Retirado de Fedor, 2009.

do AUV, permite envolver o veículo e imobiliza-lo.

A WHOI desenvolveu ainda um sistema de imobilização que, embora seja de L/R fixo ao fundo, pode ser considerado por exemplo na eclusa de um submarino: O *Autonomous Ocean Sampling Network MURI* (figura 14) é uma estrutura com dois núcleos indutivos dispostos na vertical e ligadas a um poste ao qual o AUV se aproxima por intermédio de um sensor acústico e é criado contacto através do nariz do veículo. Após este contacto, as duas superfícies aproximam-se fixando o AUV em dois pontos de apoio: um superior e um inferior. (Singh et al, 2001).

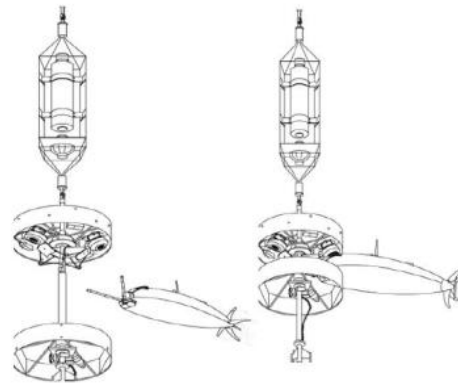


Figura 14 Método de imobilização *Autonomous Ocean Sampling Network MURI*<sup>16</sup>

A empresa Kawasaki Shipbuilding Corporation desenvolveu um sistema de imobilização de AUVs que tem um gancho na sua parte inferior que se prende a um cabo, o qual está preso num guincho. A tensão provocada no cabo pelo gancho do AUV em movimento, faz o guincho atuar e recolher o cabo juntamente com o AUV até uma plataforma horizontal (Kawasaki, 2003). Este sistema não permite a aproximação omnidireccional. A sua implementação num submarino teria que ser preferencialmente no convés com a desvantagem de que o insucesso da aproximação poderia provocar danos no convés ou até mesmo a colisão com a torre do submarino.

### 2.3.2. Sistema *Universal Launch and Recovery Module (URLM)*

A *General Dynamics Electric*, desenvolveu este sistema com o objetivo de

---

<sup>16</sup> Retirado de Singh, H. et al, 2001.

equipar os submarinos da classe “Ohio” da *U.S. Navy*), e assim dotar esta classe com o uso dos AUVs para apoio das suas missões operacionais. Este sistema, apresentado na figura 15, é composto por uma câmara de ar montada na vertical onde o AUV é colocado num berço, ainda no interior do submarino. Esta câmara está situada num dos tubos lançadores de mísseis e está ligada a um braço robótico. Antes do lançamento do AUV, a câmara é pressurizada e alagada, para posteriormente o braço robótico ser aberto até ao exterior do submarino e colocar o veículo automático numa posição paralela ao submarino e soltar o gancho mecânico para que o AUV possa iniciar a sua missão. A recolha do AUV é feita através do processo exatamente inverso, sendo que a aproximação deste à plataforma é efetuada com recurso aos sistemas de navegação do veículo e a um *transponder* acústico. O acoplamento do veículo ao sistema é feito através de um gancho mecânico que pertence à plataforma ou através de um método de tesouras mecânicas como o *Belly mounted Stinger*. A principal vantagem deste método é permitir, através de uma escotilha inferior, por onde são carregados mísseis, executar as ações de manutenção e recarga de baterias do AUV.

Este sistema foi testado em 2003 no submarino *USS Florida* da Marinha dos EUA, tendo os resultados sido satisfatórios e o lançamento e recolha dos AUV *Seahorse* obtidos com sucesso (Fedor 2009).



Figura 15 *Universal Launch and Recovery Module (ULRM)*<sup>17</sup>

### **2.3.3. Sistema *Torpedo Mounted Retractable Arm***

O sistema desenvolvido pela empresa *Boeing* (figura 16), consiste na utilização

---

<sup>17</sup> Retirado de Fedor, 2009

de dois tubos lançadores de torpedos, posicionados verticalmente, em que num destes tubos, está montado um braço mecânico que, aquando da recolha do submarino, é estendido até ao exterior do submarino e recolhe o AUV através de um gancho mecânico empurrando-o para o outro tubo de lançamento de torpedos. A aproximação do AUV ao submarino é efetuada através de sinais acústicos enviados a partir do tubo de lançamento de torpedos. Este sistema foi já testado com sucesso em 2007 a bordo do submarino *USS Hartford* da Marinha dos EUA.

Contudo tem várias desvantagens: O AUV tem que estar perfeitamente alinhado com o tubo do torpedo usado para a recolha, caso contrário o braço extensível não consegue agarrar o AUV; o sistema é muito pesado (cerca de duas toneladas) o que pode ter efeitos na estabilidade do submarino; o sistema inviabiliza o tubo de lançamentos de torpedos que contém o braço mecânico de cumprir a sua função operacional de lançar torpedos (Fedor 2009).

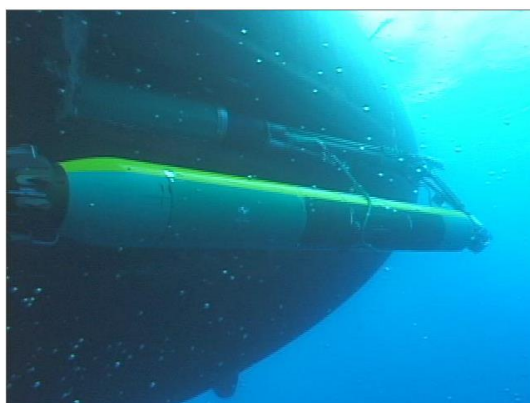


Figura 16 *Boeing Torpedo Mounted Retractable Arm*<sup>18</sup>

#### **2.3.4. Sistema de lançamento e recolha da *University of New Brunswick***

A *University of New Brunswick*, no Canadá, propôs em 2013 um sistema de recolha de AUVs a partir de submarinos através de um braço colocado no convés do submarino (figura 17). Este braço robótico telescópico tem a capacidade de se movimentar nas três direções: horizontal (esticar e encolher), vertical e rotacional. O braço pode ser atuado via mecânica através de um motor elétrico ou

---

<sup>18</sup> Retirado de *Autonomous Undersea Vehicles applications center* [www.auvac.org](http://www.auvac.org). (última consulta a 29 de dezembro de 2016)

hidrodinamicamente em que o movimento do submarino provoca movimento numa espécie de asa ou “flap” instalado no braço que o estabiliza (Watt et al 2016). Na aproximação do AUV ao sistema é proposta a utilização de sensores acústicos e óticos em simultâneo sendo ainda contemplados, como redundância, sensores eletromagnéticos. O método de captura e imobilização do AUV no convés do submarino estão ainda em estudo, não tendo ainda sido propostos para a classe de AUVs canadianos *International Submarine Engineering Explorer*. A principal vantagem deste sistema é a imobilização do AUV ser possível a uma distância considerável do submarino através do braço telescópico, minimizando a possibilidade de contacto entre ambas as plataformas. A desvantagem é a imobilização do AUV ser no convés do submarino o que não permite a descarga direta dos dados recolhidos pelo AUV para o interior do submarino que só pode ocorrer no final da missão do submarino ou quando este tenha que vir à superfície (Curie et al, 2014).

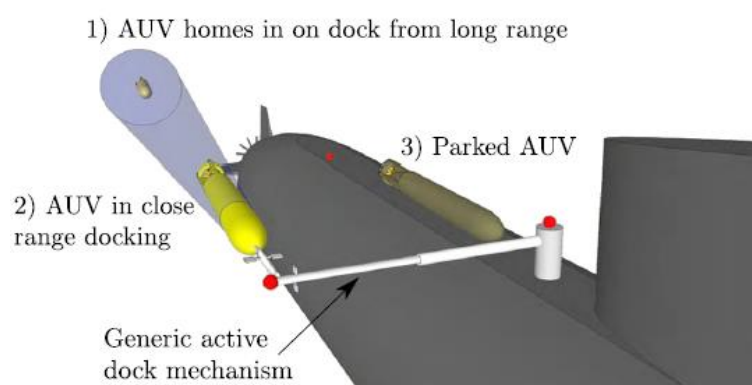


Figura 17 Projeto da Universidade de *New Brunswick*<sup>19</sup>

### 2.3.5. Sistema de lançamento e via tubos de lançamento dos torpedos

O método de lançamento de AUVs através dos tubos de lançamento dos torpedos (figura 18) tem a vantagem de não ser necessário introduzir sistemas novos e alterações estruturais no exterior do submarino. O veículo poderá, por exemplo ser guardado num dos depósitos de armas do submarino, visto que o submarino só arma para uma missão ou exercício específico em que seja necessário o seu emprego.

Os AUVs, à semelhança dos torpedos, são auto-propulsionados pelo que, são

<sup>19</sup> Retirado de Curie et al, 2013

lançados, à semelhança dos torpedos, apenas com recurso à propulsão. A monitorização do lançamento do AUV pode ser feita com recurso ao sistema lança torpedos já existente no navio, que permite acompanhar o lançamento e saber se este foi efetuado com sucesso. O sistema de recolha, no entanto, exige um sistema mecânico, que poderá ser amovível, a introduzir nos tubos ou numa plataforma ROV (Hardy & Barlow, 2008).



Figura 18 Lançamento via tubos de lançamento de armas<sup>20</sup>

A empresa *SAAB Underwater Systems*, desenvolveu já um sistema denominado SUBROV (figura 19). O ROV é assim operado por um elemento pertencente à guarnição do submarino e é também lançado pelo tubo de lançamento dos torpedos, mantendo uma ligação constante ao submarino através de um cabo de comunicação. A consola de operação permite também obter permanentemente imagens do exterior do navio através de uma câmara colocada no ROV. Deste modo, através de sinais transmitidos entre o ROV e o AUV, o veículo operado remotamente poderá ser um importante auxílio para “guiar” a navegação do AUV até entrar novamente no tubo de lançamento dos torpedos ou até mesmo, através de um sistema de acoplamento dos dois veículos, constituir, *per si*, uma plataforma de recolha. Quando os dois veículos estão acoplados, o sistema permite o envio de comandos do ROV para o AUV e inclusivamente o carregamento das baterias do AUV. O sistema permite ainda, através de uma antena incorporada no ROV, estabelecer comunicações com a superfície. A *SAAB Underwater Systems* testou este sistema com o AUV62-MR, desenvolvido pela própria empresa.

As principais vantagens do *Launch and recovery via conventional torpedo tubes*, são: permitir o lançamento e recolha de AUVs de vários diâmetros desde que tenham a forma de um torpedo e um diâmetro inferior ao do tubo; permitir ações de manutenção e de recarga de baterias no interior do submarino; não ter impacto no design original do submarino nem retirar características operacionais dos submarinos no cumprimento de outras missões; a recuperação do AUV não afetar o sistema propulsor nem o de governo

---

<sup>20</sup> Retirado de Hardy & Barlow, 2008.

do submarino não existindo riscos do veículo embater na hélice ou leme.

As desvantagens encontradas são: condicionar o espaço de arrumação de um torpedo que não pode estar no tubo; o AUV pode ser recolhido com o submarino em trânsito, contudo o trânsito tem que ser condicionado para esta manobra; não permite a aproximação omnidirecional (Fedor 2009).

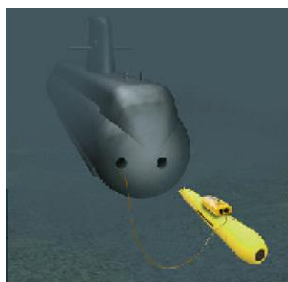


Figura 19 Método de lançamento e recolha SUBROV<sup>21</sup>

### **2.3.6. Sistema de lançamento e recolha via *dry/wet casing mounted hangar***

Uma outra opção de lançamento e recolha de AUVs é a utilização de um hangar montado no convés exterior do submarino: *Casing mounted Hangar (CMH)*. O CMH, como mostra a figura 20, é um módulo removível que pode ser instalado no submarino apenas nas missões cujo emprego de AUVs seja necessário. Este sistema requiere, no entanto, alterações específicas no submarino para que o módulo possa ser instalado no navio, contemplando uma configuração adequada de compatibilidade entre o módulo e convés, ligações elétricas entre o navio e o CMH, um sistema de drenagem de água (para permitir que o AUV fique num ambiente seco enquanto não está a ser utilizado) e uma escotilha de acesso ao interior do submarino para que sejam possíveis ações de manutenção e recarga das baterias do AUV sem a necessidade de o submarino atracar ou emergir. Este sistema pode também ser utilizado para entrada e saída de mergulhadores do submarino como alternativa à utilização da eclusa. O *Dry casing mounted hangar* é utilizado por alguns submarinos da marinha dos EUA como os submarinos da classe *Ohio* (Hardy & Barlow, 2008).

O módulo, no seu interior, deverá conter um berço para suportar o AUV antes do

---

<sup>21</sup> Retirado de [www.seaeye.com](http://www.seaeye.com) (última consulta a 25 de março de 2017)

lançamento e depois da recolha. O AUV é lançado através da abertura de uma escotilha do CMH comandada por um operador no interior do submarino, após a inundação do compartimento, com recurso à sua auto-propulsão. Para se proceder à recolha, terá que haver interação de mergulhadores que se desloquem ao exterior do submarino e que coloquem o veículo dentro do módulo ou a utilização de um sistema de recolha semelhante ao sistema de recolha através de um funil ou ao SUBROV.

Este método pode também ser aplicado em submarinos sem a componente de drenagem e inundação de água, ficando o AUV sempre em ambiente molhado. Deste modo, a instalação do método provoca menos alterações na estrutura do submarino, não permitindo que o veículo seja intervencionado no interior do submarino quando este se encontra em trânsito. A posição do módulo que menos impacto tem sobre a manobra do navio, devido a fenómenos hidrodinâmicos é a ré da torre de mastros do submarino (Hardy & Barlow, 2008).

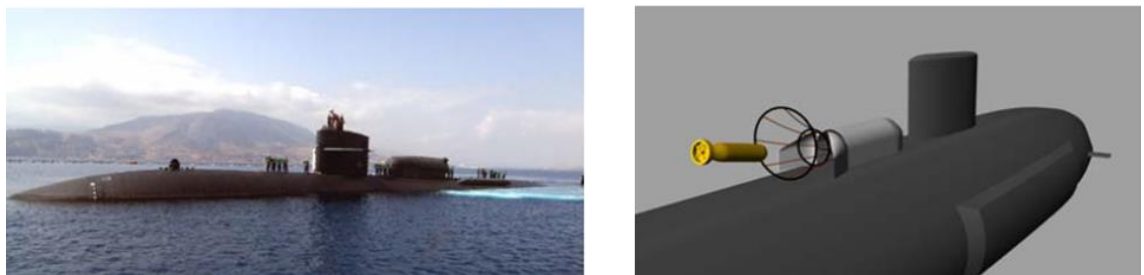


Figura 20 Lançamento e recolha *via dry/wet casing mounted hangar*<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> Retirado de Hardy & Barlow, 2008.

### 3. Teoria Axiomática de Projeto

#### 3.1. Conceitos da Teoria Axiomática de Projeto

A teoria Axiomática de Projeto ou Axiomatic Design (AD), é uma abordagem ao projeto publicada no livro “*Principles of Design*” em 1990 por Nam Pyo Suh, como resultado do trabalho realizado durante a sua permanência no MIT- Massachusetts Institute of Technology. Suh, foi reitor do Korea Advanced Institute of Science and Technology e conselheiro pessoal de Ronald Reagan, o 40º presidente dos Estados Unidos da América. Suh publicou no seu livro *Principles of Design*, o resultado do seu estudo que culminou na definição de dois axiomas que devem presidir à execução de bons projetos. A partir destes dois axiomas é possível obter teoremas e corolários que facilitam a escolha de bons projetos. Segundo Suh, a axiomática de projeto permite avaliar o processo criativo para selecionar apenas as melhores ideias. No entanto, a AP deve ser abordada como um caminho para modelar as relações entre todo o conhecimento existente num projeto e não como um algoritmo de realização de um projeto (Thompson 2013).

O projeto é definido por Suh em quatro domínios representados na figura 21, que surgem a partir das necessidades do cliente, consideradas no domínio de projeto (domínio do cliente). Seguem-se os domínios funcional, físico e o das variáveis de processo. O projeto é a definição alternada entre o domínio funcional e o domínio físico num processo sucessivo de decomposição desde o nível mais elevado de conceção do sistema até aos diversos subsistemas, equipamentos e peças que o constituem. O domínio funcional contempla os requisitos funcionais (RFs), ou seja, a definição das funções que o projeto deverá desempenhar a partir das necessidades do cliente e os constrangimentos impostos ao projeto. O domínio físico contém os parâmetros de projeto (PPs) que se obtêm a partir dos requisitos funcionais e que definem o sistema ou artefacto. Por fim, o domínio das variáveis necessárias ao processo de fabrico dos PPs, como por exemplo processos de maquinagem, ou em caso de *softwares* através de tradutores de linguagem ou programas compiladores (Suh, 1998).

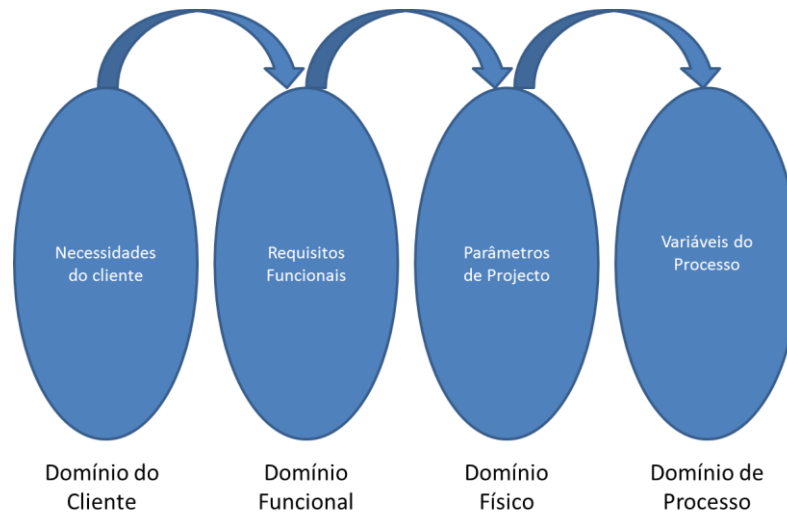


Figura 21 Domínios do projeto

De acordo com a AP, os projetos são desenvolvidos desde um nível mais generalizado chamado nível do sistema, até níveis mais específicos, suficientemente detalhados em que o projeto esteja claramente descrito. Os RFs são definidos em níveis sucessivos de decomposição, de modo a que cada nível dependente de composição espelhe o nível acima, em conformidade com os PPs escolhidos no nível acima. Deste modo, um determinado parâmetro de projeto num determinado nível, deve estar contido em parâmetros de níveis superiores e tem influência direta nos RFs do nível imediatamente inferior. A este processo chama-se processo de zig-zag (figura 22). Deve fazer-se um esforço para se escolher o menor número de RFs em níveis superiores, de modo a tornar mais fácil o cumprimento desses requisitos.

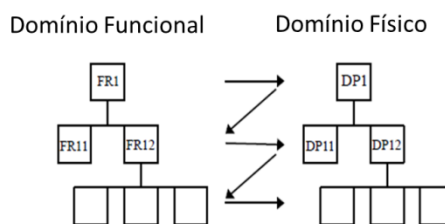


Figura 22 Processo em Zig-Zag<sup>23</sup>

A figura 23 mostra o ciclo da criação de um projeto ou modelo de desenvolvimento de um projeto. A partir das necessidades do cliente inicia-se a

<sup>23</sup> Retirada de Thompson, 2013

caracterização funcional dessas mesmas necessidades e só depois se inicia o processo criativo. Daí, surgem as ideias de projeto a partir de ideias já existentes ou da adaptação de sistemas semelhantes. Este processo vai-se repetindo nos níveis inferiores de decomposição em conformidade com as necessidades do cliente e com constrangimentos que podem ser da sociedade em geral. A escolha dos parâmetros de projeto tem em conta um processo de síntese de diversos fatores como a prática comum, a cultura ou a legislação existente e em vigor. Equipas de trabalho e de projeto diferentes podem escolher diferentes parâmetros de projeto para os mesmos requisitos funcionais definidos. Torna-se, no entanto, imperativo utilizar uma abordagem analítica para verificar essas mesmas ideias.

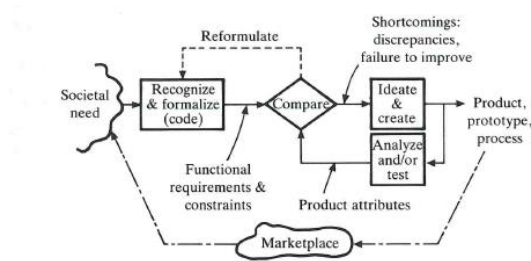


Figura 23 Ciclo de projeto<sup>24</sup>

Os axiomas, enunciados de seguida, constituem critérios objetivos de avaliação da qualidade dos projetos propostos, que aumentam a produtividade da equipa de projeto. Dos axiomas seguidamente enunciados podem ser formulados teoremas que serão enunciados aquando da explicação do conceito de independência através das matrizes de projeto e corolários que serão apresentados no final da descrição da AP.

Axioma 1: Axioma da independência – Maximizar a independência dos requisitos funcionais.

Axioma 2: Axioma da informação – Minimizar o conteúdo de informação de um projeto (conteúdo de informação é definido mais à frente neste capítulo).

Suh define a equação do projeto como:

$$[FR] = [A][PP] \text{ (eq. 3.1)}$$

<sup>24</sup> Retirado de Suh, 1990

Nesta equação,  $[RF]$  e  $[PP]$  são vectores. A matriz  $[A]$  representa a matriz de projeto. Os elementos constituintes da matriz podem ser valores numéricos constantes, funções matemáticas ou simplesmente relações assinaladas por um “X” para representar que um parâmetro de projeto influencia um determinado requisito funcional. No caso de não haver influência no RF, o elemento da matriz  $[A]$  é preenchido com o valor zero.

Os projetos podem ser separados em três categorias: *coupled design* ou projeto acoplado, *uncoupled design* ou projeto desacoplado e *decoupled design* ou projeto desacoplável. Um projeto desacoplado satisfaz o Axioma 1, ou seja, todos os requisitos funcionais são alcançados independentemente uns dos outros. Num projeto acoplado os requisitos funcionais não são totalmente independentes uns dos outros, pelo que é difícil a obtenção de uma solução. Os projetos desacopláveis têm a particularidade de os RFs terem de ser alcançados de acordo com uma sequência determinada de atribuição de valores aos respetivos PPs.

Num projeto desacoplado, que dentro dos três tipos anteriormente enunciados representa o ideal (enunciado do teorema 4 da AP), a matriz  $[A]$  é diagonal (como a eq. 3.2), ou seja, cada PP tem influência apenas num RF, garantindo a independência e o cumprimento do axioma 1. Para satisfazer os requisitos funcionais de um projeto desacoplado, é indiferente a ordem de atribuição dos PPs visto que cada PP satisfaz apenas um RF (enunciado do teorema 6).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \text{ (eq. 3.2)}$$

Se  $[A]$  constituir uma matriz triangular (tanto superior como inferior, como é o caso da eq. 3.3), o axioma 1 só será satisfeito se houver uma ordem específica de atribuição de valores aos parâmetros de projeto para satisfazer os requisitos funcionais independentemente (enunciado do teorema 7). A matriz seguinte refere-se a um exemplo de um projeto desacoplável. Um exemplo deste tipo de projetos é o processo de desumidificação de um fluxo de ar com controlo de temperatura, que exige o arrefecimento do ar seguido do seu reaquecimento. Nesta situação, a função de aquecimento tem de ser realizada por imposição física, posteriormente à função do arrefecimento, sendo portanto um projeto desacoplável (Santos, 2010).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \text{ (eq. 3.3)}$$

Quando a matriz  $[A]$  não é diagonal nem triangular (como é exemplo a eq. 3.4) ou quando existem mais RFs do que PPs, o projeto é acoplado pois cada PP tem influência em mais do que um RF e não é possível obter uma sequência, sendo o axioma 1 violado .

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \text{ (eq. 3.4)}$$

Um projeto pode ainda se considerado redundante se o número de PPs for superior ao de RFs (teorema 3). Num nível de decomposição, pode obter-se um projeto redundante que não espelhe a realidade. Nesse caso, deve a equipa de projeto adicionar um RF ou refazer o conjunto de RFs. Ao adicionar ou ao refazer um conjunto de RFs de um projeto, os PPs terão que ser todos revistos pois poderão não satisfazer o(s) novo(s) RF(s) (enunciado do teorema 5). Se o projeto tem um número de PPs inferior ao dos RFs (enunciado do teorema 1), um ou mais requisitos não serão satisfeitos. A solução para este problema pode passar por se adicionar um novo PP (enunciado do teorema 2) que satisfaça o requisito em falta.

Um projeto tem geralmente constrangimentos (Cs), ou seja, fatores condicionantes que não permitem a total liberdade criativa. Os constrangimentos dividem-se em dois tipos: Constrangimentos de *Input* e constrangimentos de sistema. Os constrangimentos de Input são referentes às especificações do projeto, como por exemplo limitações de dimensionamento e de materiais a utilizar. Os constrangimentos de sistema são impostos pelo próprio sistema e pelas interações deste com sub-sistemas, como por exemplo as formas geométricas a adotar e as capacidades mecânicas ou elétricas a projetar. É, por vezes, difícil definir as diferenças entre os constrangimentos e os requisitos funcionais de um projeto. Inclusivamente, um requisito funcional num determinado projeto, poderá constituir um constrangimento num projeto diferente. A diferença entre estes dois conceitos é que os constrangimentos limitam o projeto, ou seja, o projeto só é aceitável se não ultrapassar os constrangimentos definidos enquanto

os requisitos funcionais devem ser definidos com uma tolerância. É a partir da tolerância de projeto definida nos requisitos funcionais que se calcula o conteúdo de informação do projeto, escolhendo-se os projetos que tenham a menor conteúdo de informação (axioma 2). O conteúdo de informação necessário é um modo de identificar a complexidade do projeto (Suh 1990), não dependendo do número de componentes necessários ao funcionamento do sistema. A AP calcula o conteúdo de informação necessário ao projeto no domínio funcional e não no físico. Neste aspecto a AP distingue-se de outras abordagens que avaliam os aspectos físicos do projeto. Para um único RF o conteúdo de informação define-se como:

$$I = \log_2 \left( \frac{\text{área de funcionamento do sistema}}{\text{área comum}} \right) \quad (\text{eq. 3.5})$$

$$I = \log_2 \left( \frac{1}{p} \right) \quad (\text{eq. 3.6})$$

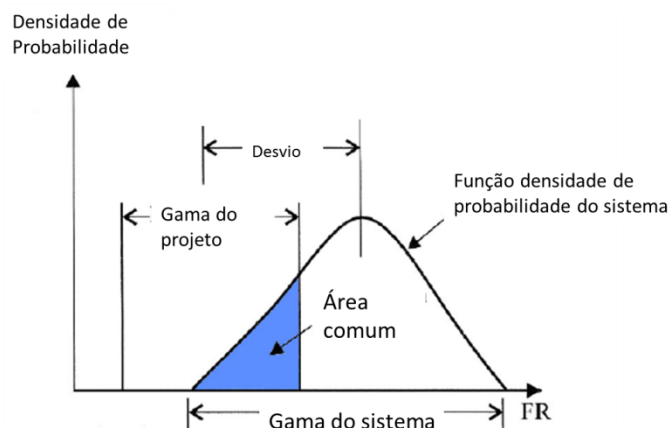


Figura 24 Área da função densidade de probabilidade de um sistema<sup>25</sup>

Em que a área de funcionamento do sistema representa a área da função densidade de probabilidade do funcionamento do sistema, a área comum (assinalada a azul na figura 24) é a intersecção do intervalo de tolerância em que se define o projeto (ou gama de projeto) com a área da função densidade de probabilidade. A gama do sistema é o intervalo em que o sistema pode funcionar sem entrar em conta com os requisitos funcionais do projeto a propor.  $p$ , na eq. 3.6 representa a probabilidade de

<sup>25</sup> Retirada de Suh, 2001.

sucesso e a base logarítmica utilizada de 2 permite obter o resultado final em *bits*. Um exemplo é o cálculo da informação que uma pessoa dispõe para tentar adivinhar o naipe de uma carta de um baralho de cartas regular de 52 cartas. A informação que dispõe é que cada naipe tem 13 cartas e que o total são 52 cartas, logo segundo a equação 3.6 o conteúdo da informação é  $I = \log_2 \left( \frac{13}{52} \right) = 2 \text{ bits}$  (Suh, 1990). Outro exemplo pode ser a o processo de manufatura de uma barra de 1 m de comprimento. Num caso a tolerância é de  $\pm 0,0001$  m e noutro caso é de  $\pm 0,1$  m. Assim sendo, utilizando a mesma máquina nos dois casos o conteúdo de informação será maior quanto menor for a tolerância (Park, 2007).

A partir dos dois axiomas de projeto (axioma da independência e axioma da informação), formulam-se sete corolários para facilitar a aplicação dos axiomas e decisões de projeto na definição do domínio funcional e do domínio físico:

- Corolário 1: Se os RFs estão acoplados ou são interdependentes, devem ser separadas ou desacopladas através da revisão do conjunto de PPs propostos.
- Corolário 2: Os RFs e os constrangimentos devem ser minimizados para facilitar o projeto.
- Corolário 3: No domínio físico, os parâmetros de projeto devem ser integrados numa única parte física se os RFs forem satisfeitos independentemente na solução proposta.
- Corolário 4: No domínio físico devem ser utilizadas peças standardizadas e substituíveis desde que estas sejam consistentes com os RFs e os constrangimentos.
- Corolário 5: No domínio físico devem ser utilizadas peças ou componentes de forma simétrica desde que sejam consistentes com os RFs e com os constrangimentos.
- Corolário 6: A tolerância atribuída a cada RF deve ser a maior possível.
- Corolário 7: deve ser procurado um projeto desacoplado que contenha menos conteúdo de informação do que qualquer projeto acoplado para satisfazer um determinado conjunto de RFs.

### 3.2. Aplicação do axioma da independência aos sistemas de L/R de AUVs

Pretende-se agora aplicar o primeiro axioma da teoria Axiomática de Projeto aos vários sistemas de lançamento e de recolha de AUVs a partir dos submarinos descritos no capítulo 2. Através da aplicação do axioma da independência aos requisitos funcionais, parâmetros de projeto dos vários sistemas e da consequente formulação das matrizes de projeto será possível detetar acoplamentos que não serão desejados no projeto em estudo.

As várias avaliações que são feitas neste capítulo não têm em conta os constrangimentos de cada um dos sistemas e são efetuadas até ao segundo nível de decomposição. Os sistemas apresentados são sequenciais, isto é, o sistema só é satisfeito com sucesso se os requisitos forem satisfeitos pela ordem devida. Assim, são assinalados na matriz com o carácter “s” as dependências cronológicas, entre etapas de funcionamento, e com o carácter “X” as dependências mecânicas entre os vários requisitos funcionais numa mesma etapa de funcionamento do sistema.

Para a aplicação do primeiro axioma, os sistemas e as respetivas matrizes de projeto são apresentados com a fase de lançamento e de recolha separadamente. Esta escolha deve-se ao facto de os submarinos da classe *TRIDENTE*, em estudo na presente dissertação, permitirem o lançamento e a recolha ser proposto de forma também independente e em locais diferentes.

Com este estudo pretende-se comparar os sistemas descritos anteriormente e deste modo identificar se há acoplamentos nos projetos e identificar quais os requisitos funcionais que são transversais aos sistemas de lançamento e recolha para facilitar a proposta de um sistema para os submarinos da classe *TRIDENTE*.

#### 3.2.1. Sistema de lançamento *Universal Launch and Recovery Module*

Da análise da equação 3.7 cujos RFs e PPs estão descritos na figura 25, este sistema é desacoplável e, por conseguinte, os requisitos têm que ser satisfeitos numa ordem específica, apesar de não existir qualquer dependência entre os requisitos funcionais a nível mecânico. Por exemplo, a ativação da propulsão do AUV (RF2.6) é um requisito que, mecanicamente, não depende de nenhum dos anteriores mas que





RF1.4 depende do PP1.3 na medida em que só pode ser acionado sistema de garra ou tesoura mecânica quando o veículo estiver na posição pré-definida de imobilização. A matriz de projeto é também triangular e a satisfação dos vários requisitos funcionais definidos depende da satisfação dos anteriores.

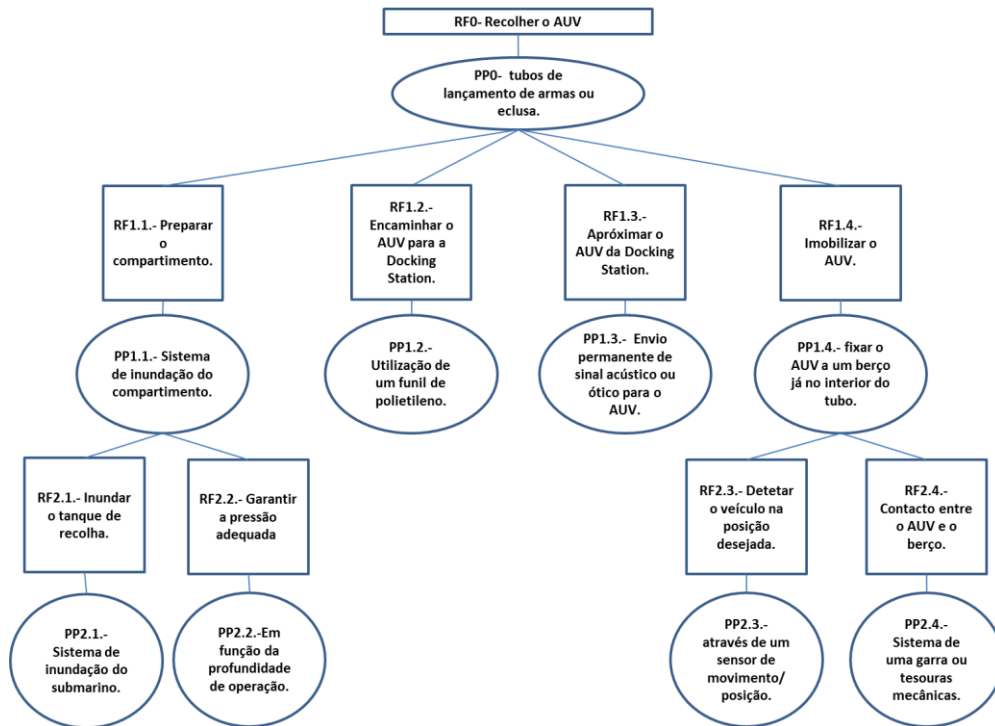


Figura 27 Decomposição funcional do sistema de recolha através de um funil ou cone

$$\begin{bmatrix} RF0 \\ RF1.1 \\ RF1.2 \\ RF1.3 \\ RF1.4 \\ RF2.1 \\ RF2.2 \\ RF2.3 \\ RF2.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & & & & & & & & \\ & X & & & & & & & \\ & s & X & & & & & & \\ & s & X & X & & & & & \\ & s & s & s & X & & & & \\ & & & & X & & & & \\ & & & & s & X & & & \\ & & & & s & s & X & & \\ & & & & s & s & X & X & \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} PP0 \\ PP1.1 \\ PP1.2 \\ PP1.3 \\ PP1.4 \\ PP2.1 \\ PP2.2 \\ PP2.3 \\ PP2.4 \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 3.9})$$

### 3.2.4. Sistema de recolha *Universal Launch and Recovery Module*

A matriz de projeto (eq. 3.10) revela um acoplamento no projeto. O RF2.6- Recolher o braço mecânico para o interior do submarino com o AUV fixo ao berço-









### 3.3. Conclusões retiradas da aplicação da teoria Axiomática de Projeto

Da aplicação do primeiro axioma aos vários sistemas de lançamento e recolha de AUVs a partir de submarinos, é possível fazer uma comparação dos que têm ou não acoplamentos. Do estudo efetuado, identificaram-se acoplamentos no *Universal Launch and Recovery Module* na fase de recolha. Todos os restantes são desacopláveis e para os comparar seria necessário recorrer ao axioma da informação com exceção à fase de lançamento do *Universal Launch and Recovery Module*. Por não haver dados estatísticos da taxa de sucesso de todos os sistemas, essa análise não é feita na presente dissertação. No entanto, e como foi referido no início deste capítulo, a análise efetuada não tem em consideração os constrangimentos. A formulação dos requisitos funcionais e parâmetros de projeto no ponto anterior torna mais simples o cruzamento dos constrangimentos impostos pela Marinha Portuguesa com os sistemas já existentes. Deste modo, torna-se possível limitar, no capítulo 4 os sistemas que podem ser adaptados aos submarinos da classe *TRIDENTE*.

A aplicação do primeiro axioma aos vários sistemas de Lançamento e recolha de AUVs permitiu retirar uma conclusão interessante de que os requisitos funcionais enunciados nos vários sistemas dependem dos anteriores numa sequência cronológica de ação, isto é, um requisito só pode ser satisfeito se os anteriores já tiverem sido satisfeitos também, antes para que o sistema todo funcione com sucesso. Com base nesta avaliação os projetos com exceção ao sistema de lançamento ULRM, são considerados projetos desacopláveis devido ao facto de a satisfação dos requisitos ter uma ordem cronológica específica para que o sistema funcione com sucesso.

É de notar que existem requisitos que são comuns a praticamente todos os sistemas de recolha avaliados e que o mesmo acontece também aos sistemas de lançamento. Nos sistemas de recolha são comuns no primeiro nível de decomposição os requisitos da preparação do compartimento a receber o AUV, da receção do AUV na Docking station e a imobilização do AUV. No nível dois, a aproximação do AUV à *Docking Station*, a deteção do veículo na posição desejada para o imobilizar e a criação de contacto entre o AUV e o berço são também comuns a todos os sistemas. Nos sistemas de lançamento os requisitos de nível um de decomposição, são comuns aos dois sistemas estudados. No nível dois existem também requisitos comuns como a

inundação e pressurização dos tubos e a interrupção de contacto entre o berço e o veículo. Esta conclusão revela-se importante pois os requisitos comuns aos vários sistemas serão também utilizados no sistema proposto na presente dissertação.

A aplicação da axiomática de projeto constitui neste capítulo um método de comparação entre os sistemas já existentes para facilitar a definição dos requisitos funcionais no capítulo 4.



## 4. Análise e definição do problema

O presente capítulo define e analisa o problema do desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha de AUVs a partir dos submarinos da classe *TRIDENTE*. Para tal, são identificadas as necessidades do cliente, os constrangimentos impostos e os requisitos funcionais e operacionais do sistema e dos AUVs. Segundo o SBS definido na introdução, o sistema de lançamento e recolha do AUV SEACon envolve tanto o submarino como o AUV, bem como os conceitos de operações de ambos.

A definição dos conceitos mencionados no parágrafo anterior, é efetuada com base na teoria Axiomática de Projeto para permitir a aplicação do primeiro axioma à solução proposta.

### 4.1. Necessidade da Marinha Portuguesa

O interesse no desenvolvimento do sistema de lançamento e recolha de AUVs, partiu da Marinha Portuguesa particularmente da Esquadilha de Sub-Superfície. A ESS é o organismo responsável tanto pelos submarinos da classe *TRIDENTE*, como pelo DMS3 que detém a guarda e operação dos AUVs. A Marinha Portuguesa precisa de desenvolver e instalar um sistema de lançamento e recolha dos AUVs SEACon, nos submarinos da classe *TRIDENTE*. Esta necessidade surge da importância de projetar os AUVs numa missão, sem recorrer ao uso de mergulhadores no exterior do navio com este submergido.

O SBS da estação de recolha é apresentado na fig. 32, da qual a presente dissertação tem especial foco no subsistema mecânico, de emergência e de manutenção. Os restantes subsistemas são também abordados com menos detalhe pelo facto de o processo criativo do *design* ser inter-disciplinar e ter obrigatoriamente que ter em consideração todas as áreas do projeto.

O projeto de um sistema de lançamento e recolha de AUVs deve considerar, então, as seguintes áreas de projeto diferentes:

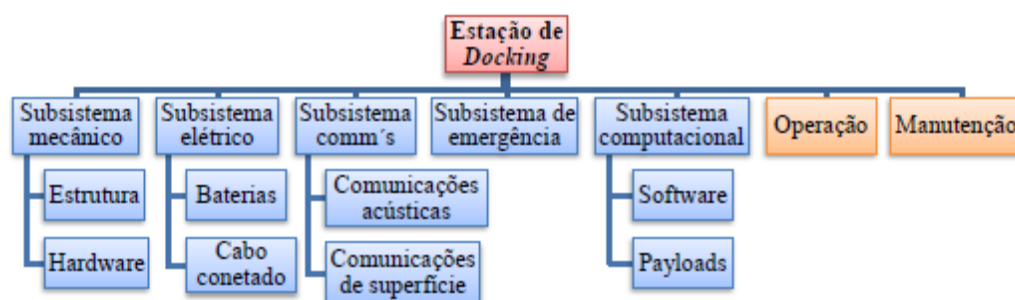


Figura 32 SBS da estação de recolha<sup>26</sup>

Mecânica – Interação física entre o submarino e o AUV. É esta a área com maior foco nesta dissertação através da proposta e dimensionamento de uma peça que encaixa no tubo de lançamento de armas dos submarinos que permite acomodar o AUV no seu interior e que permite o lançamento e recolha do mesmo para o exterior do submarino.

Elétrica – Ligação do AUV ao sistema de L/R bem como dos componentes que o compõem e necessitam de energia para atuar, e ligação dos sistemas do AUV ao submarino para descarga de dados adquiridos (pós-missão);

Comunicações e posicionamento do AUV – Ligação entre os sistemas de comunicações utilizados pelo submarino e o AUV, o que é particularmente importante na fase de aproximação do AUV ao submarino para a recolha e monitorização do afastamento do AUV na fase de lançamento.

Computacional- Contempla quaisquer softwares que sejam instalados no própria sistema de L/R, como por exemplo a atuação automática de algum componente.

Operação – Empenhamento dos elementos da guarnição nas operações com o AUV. Estas operações contemplam a colocação do sistema de L/R no tubo de lançamento de armas e do AUV no próprio sistema (pré-lançamento) e o processo contrário de retirada do sistema L/R do tubo e ações de manutenção tanto ao sistema como ao AUV (pós-recolha).

<sup>26</sup> Retirada de Azevedo, 2013

## 4.2. Constrangimentos impostos ao projeto

Como definido no capítulo 3, os constrangimentos são os limites de uma solução aceitável e adequada às necessidades pretendidas.

Cs1. Evitar modificações físicas permanentes nos submarinos que alterem a capacidade operacional do mesmo, isto é, o desenvolvimento do sistema não poderá retirar, restringir ou alterar nenhuma das capacidades operacionais dos submarinos, que são fundamentais para o cumprimento das suas missões.

Cs2. Evitar que o AUV colida com o submarino nas operações do lançamento e recolha a fim de não danificar nenhuma das duas plataformas e de manter a máxima discrição das operações.

Cs3. As ações de manutenção devem ser realizadas no interior do submarino evitando o empenhamento de recursos humanos (militares do Destacamento de Mergulhadores Sapadores) no exterior do submarino durante estas ações.

Cs4. Ter compatibilidade com o sistema de bloqueio dos torpedos ou minas no interior do tubo, ou seja, enquanto o submarino navega sem emprego do sistema de lançamento e recolha, este deve ir preso noutra ponta que não o sistema *weapons transport device*. O sistema *weapons transport device* está já instalado no submarino e é o sistema responsável por empurrar as minas ao longo do tubo de lançamento de armas aquando do seu lançamento e de puxar os torpedos para o interior do tubo aquando das fainas de munições pré-missão.

Cs5. Evitar haver comprometimento dos sistemas do submarino (comunicações, energia, falha de propulsão) quando efetuado o lançamento ou a recolha do AUV.

Cs6. O método de imobilização terá que ter em conta que o casco do AUV e os sensores não poderão ser danificados.

Cs7. Evitar o uso de sistemas de comunicação acústicos entre o veículo autónomo e o submarino na fase de aproximação, de modo a não denunciar a posição das duas plataformas a navios hostis.

Cs8. O processo deverá ser monitorizado a partir do interior do submarino.

Cs9. O diâmetro do tubo do torpedo é um constrangimento ao dimensionamento. Da mesma maneira, o material do suporte já dimensionado terá que ir ao encontro do meio ao qual estará exposto e terá que ser facilmente instalado e desinstalado.

Cs10. Deve ser possível remover o sistema por dois elementos da guarnição do submarino pelo que o peso total do sistema tem que ser inferior a 60 kg (por ser uma movimentação de cargas ocasional, DL 330/93, de 25 de Setembro)

Cs11. O sistema tem que suportar no mínimo 10 bar (cerca de 100 m de profundidade na coluna de água da máxima profundidade de operação dos AUVs);

Cs12. Influência das condições METEOC no lançamento e recolha de AUVs (apresentados já anteriormente no capítulo 1).

A tabela 3 compara os vários sistemas estudados no capítulo 2 com os constrangimentos apresentados no presente capítulo. Na tabela, é assinalado com um “X” os sistemas que não cumprem o constrangimento dessa linha e assinalado com um “X\*” os sistemas que do modo como estão descritos no capítulo 2 não cumprem com o constrangimento mas em que existe um conceito alternativo já proposto ou cujo conceito não está disponível na descrição anteriormente apresentada.

Tabela 3 Comparação dos vários sistemas de L/R estudados com os constrangimentos impostos

	Método do funil ou cone	<i>Universal L/R module</i>	<i>Boeing Torpedo mounted retractable arm</i>	<i>The University of New Brunswick</i>	<i>Dry/wet mounted casing hangar</i>	<i>SAAB SubROV</i>	<i>Via torpedo tube</i>
Cs1		X	X	X	X		
Cs2							
Cs3				X			
Cs5							
Cs6							
Cs7	X*	X	X	X	X	X	
Cs8	X*	X*	X*	X*	X*		
Cs10		X	X	X	X		

Conforme visível na tabela 3, estão assinalados com “x\*” no Cs8 todos os sistemas com exceção ao SAAB SubROV e ao sistema de lançamentos via tubo dos torpedos. No sistema da SAAB, o ROV tem uma câmara incorporado que permite monitorizar todo o processo e no sistema de lançamento via tubos dos torpedos é também dito na sua descrição que o processo de lançamento consegue ser monitorizado através da plataforma do submarino. Nos restantes sistemas que estão assinalados na tabela, não é referido na sua descrição no capítulo 2, nenhum método de monitorização dos processos de L/R, sendo que será possível acrescentar em todos, por exemplo, uma câmara que transmita imagem em direto para o interior do submarino. Do mesmo modo, é possível o método do funil ou cone respeitar o Cs7 através do algoritmo de aproximação que utiliza luzes já mencionado no capítulo 2.

Tendo em conta os sistemas de lançamento e recolha de AUVs a partir de submarinos apresentados no capítulo 2, apenas o sistema de lançamento através dos tubos dos torpedos satisfaz na totalidade os constrangimentos impostos pela Marinha

Portuguesa. Surge então a necessidade de definir os requisitos funcionais e os parâmetros de projeto de um novo sistema que satisfaça estes constrangimentos. Para este projeto podem ser utilizados como ponto de partida os requisitos funcionais que se concluiu no capítulo anterior serem transversais a praticamente todos os sistemas e pode-se, ainda, considerar alguns parâmetros de projeto desde que o projeto cumpra os constrangimentos impostos.

### **4.3. Requisitos Funcionais**

O estudo feito no capítulo anterior permitiu concluir quais os requisitos funcionais que são comuns aos diferentes sistemas de lançamento e recolha de AUVs a partir de submarinos. Através deste estudo e da definição dos constrangimentos impostos pela Marinha Portuguesa e pelo próprio LSTS no que diz respeito ao estado de desenvolvimento do projeto SEACon, são formulados os requisitos funcionais do sistema que se pretende desenvolver. Os requisitos funcionais são apresentados até ao terceiro nível de decomposição e a fase de lançamento e recolha são também definidas de modo independente em dois diagramas diferentes, à semelhança do que foi feito no capítulo 3 com a aplicação do primeiro axioma aos sistemas de lançamento e recolha de AUVs, já desenvolvidos. Os requisitos funcionais formulados estão de acordo com o estudo de Podder, Sibenne e Bellingham em 2004, que apresenta os requisitos funcionais de sistemas de recolha para receber AUVs com missões científicas atribuídas. São apresentados nas tabelas 4 e 5 os requisitos funcionais que servem de partida para a formulação da decomposição funcional do sistema de L/R através dos submarinos, não estando apresentados nestas tabelas os PPs de nível 1 que, de acordo com a AP, condicionam pelo método de zig-zag os requisitos funcionais de nível 2.

Tabela 4 Requisitos funcionais de níveis 1 e 2 do sistema de lançamento

Nível 1	Nível 2
RF1.1- Preparar o sistema para o lançamento	RF2.1- Introduzir o AUV no sistema de L/R
	RF2.2- Prender o sistema L/R ao sistema <i>Weapons Transport device</i>
RF1.2- Preparar o compartimento para o lançamento.	RF2.3- Inundar o tubo de lançamento de armas
	RF2.4- Pressurizar o lançamento de armas
RF1.3- Movimentar o sistema de L/R dentro do tubo de lançamento de armas	RF2.5-empurrar o sistema na horizontal para próximo da tomada de casco
	RF2.6- Abrir o funil
RF1.4- Lançar o AUV do L/Rs	RF2.7- Interromper o contacto entre o AUV e o Berço
	RF2.8- Interromper o contacto entre o AUV e o Berço

Tabela 5 Requisitos funcionais de níveis 1 e 2 do sistema de recolha

Nível 1	Nível 2
RF1.1- Receber o AUV no sistema de L/R	RF2.1- Aproximar o AUV do sistema de L/R
	RF2.2- Encaminhar o AUV para o sistema de L/R
RF1.2- Imobilizar o AUV	RF2.3- Aproximar o AUV da tesoura mecânica
	RF2.4- Desativar a propulsão do AU.
RF1.3- Movimentar o sistema dentro do tubo	RF2.5-Puxar o sistema na horizontal para próximo da escotilha do tubo.
	RF2.6- Fechar e recolher o funil.



## 5. Proposta de sistema de lançamento e recolha

### 5.1. Caracterização do subsistema mecânico

Neste capítulo são apresentados dois sistemas de lançamento e recolha dos AUVs SEACon, numa primeira fase sob a forma narrativa de *use cases* e posteriormente com a apresentação da decomposição funcional da axiomática de projeto, com os requisitos funcionais e respetivos parâmetros de projeto. Apenas o segundo funciona nos tubos de lançamento de armas dos submarinos da classe *TRIDENTE* que usa uma peça para transpor o funil do casco resistente para além do casco hidrodinâmico do submarino, entre os quais existem apenas quatro calhas equidistantes. O primeiro sistema que será apresentado pode, no entanto, ser aplicado a outro tipo de submarinos e ser o ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha dos AUVs SEACon através de navios de superfície. As propostas apresentadas respeitam os constrangimentos impostos pela ESS definidos no capítulo 4.

A figura 33 caracteriza o SBS do subsistema mecânico do sistema de L/R, permitindo visualizar genericamente os constituintes da estrutura proposta que serão descritos na próxima secção.

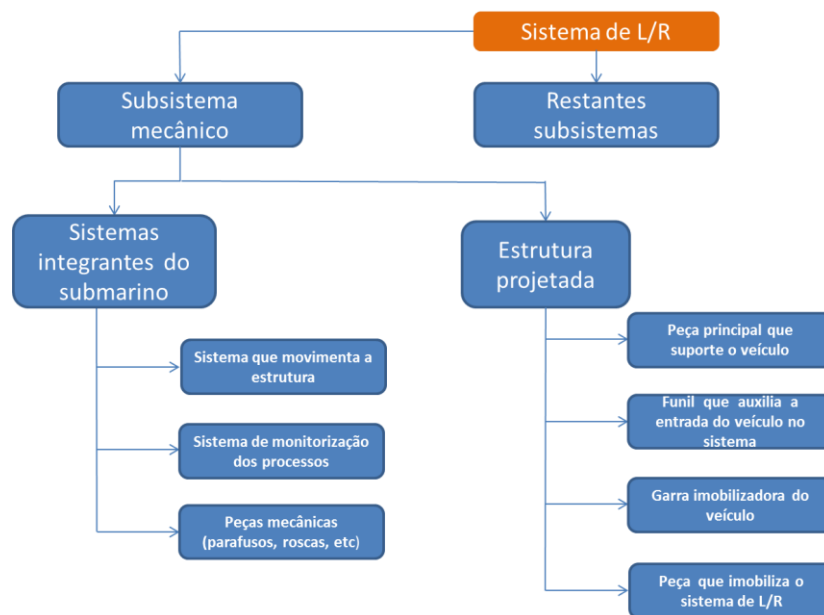


Figura 33 SBS do subsistema mecânico do sistema de L/R

## 5.2. Aplicação do primeiro axioma ao projeto proposto

À semelhança do que foi já mencionado na descrição do sistema, os requisitos funcionais do projeto proposto apresentam dependências cronológicas, ou seja, para serem satisfeitos têm que ter sido já satisfeitos os anteriores, assinaladas na matriz de projeto com o carácter “s”. Para além disso, foi detetado que o RF 2.5-empurrar o sistema na horizontal para próximo da tomada de casco- depende do RF2.2- prender o L/Rs ao sistema *weapons transport device*- pois o sistema só poderá se empurrado ao longo do tubo com sucesso se o encaixe ao *weapons transport device* estiver na posição correta. Ainda, os RFs 3.9- parar o movimento na posição de lançamento- e 3.10- afundar o sistema em caso de emergência- dependem ambos dos RFs 3.3- montar o sistema *loading Jack* ao carril dos tubos- e 3.4- montar o encaixe *do loading Jack* na peça principal- como consequência da dependência anteriormente mencionada no segundo nível de decomposição que se reflete também no terceiro nível. Os restantes PPs satisfazem um e apenas um RF no que diz respeito ao funcionamento mecânico, isto é, os RFs não dependem de mais nenhum outro requisito funcional para serem atuados e satisfeitos com sucesso. Deste modo, da análise da equação 5.1. e da figura 34 conclui-se que o projeto é desacoplável.

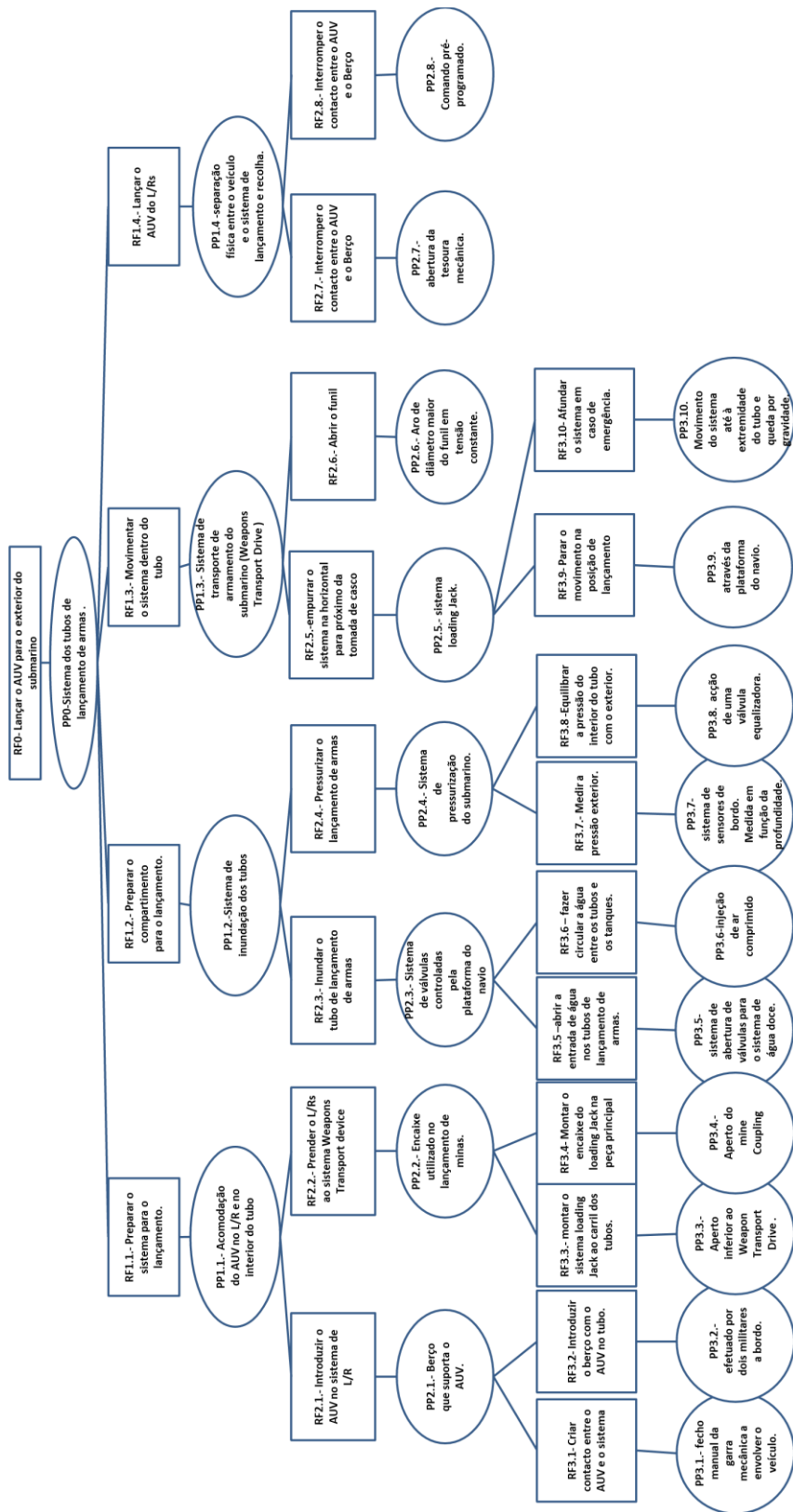


Figura 34 Decomposição funcional da fase de lançamento da proposta desenvolvida





tendo em conta os constrangimentos e os requisitos operacionais dos veículos autónomos, constitui o primeiro passo de verificação do sistema ao nível de decomposição mais elevado. A avaliação da matriz de projeto e a conclusão de que o projeto é desacoplável, constitui também uma etapa de validação do sistema proposto.

### 5.3. Estrutura proposta

A solução proposta, apresentada na figura 36, é fruto da formulação dos parâmetros de projeto contém três partes diferentes que serão explicadas individualmente nesta secção: a peça principal (figura 37), o funil (figura 38) e a garra mecânica (figura 39).

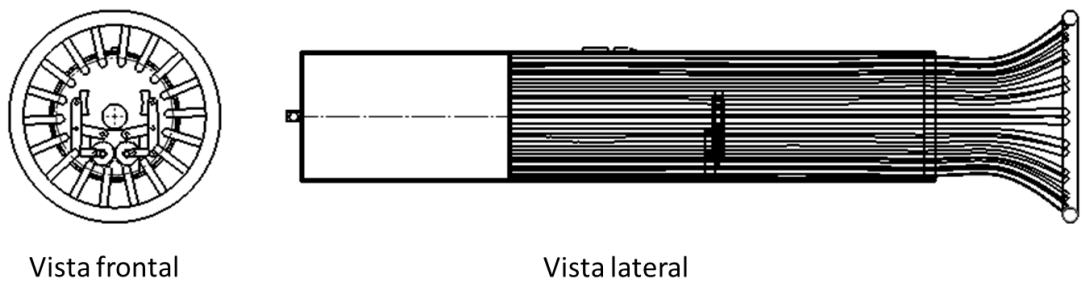


Figura 36 Vista frontal e lateral da estrutura

- A peça principal;

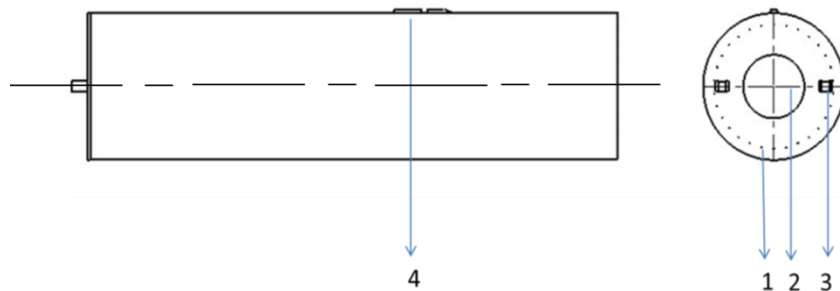


Figura 37 Vista frontal e lateral da peça principal

O desenho técnico desta peça encontra-se no apêndice B com cotas que serão explicadas ponto 6.3. O diâmetro externo da peça principal é 533 mm que corresponde ao diâmetro dos torpedos e das minas utilizadas nos tubos de lançamento de armas de modo a estar em contacto com as quatro calhas equidistantes que estão dispostas ao longo de todo o tubo de lançamento de armas. O prato tem um furo (nº 2 da figura 37) que permite reduzir a resistência da água ao movimento da peça nos tubos e que não

interfere com o encaixe do sistema *Loading Jack*<sup>27</sup> (nº 3 da figura 37). Este encaixe na peça principal foi desenhado de modo exatamente igual ao encaixe das minas Murena de modo a utilizar os recursos e peças já existentes. Os furos dispostos na superfície do prato (nº1 da figura 37) constituem o local de encaixe do funil. O sistema de fixação ao tubo (nº 4 da figura 37) ou também chamado *Top Stop*, foi também desenhado exatamente com as mesmas dimensões das minas Murena. Este sistema cujo encaixe compatível no tubo de transporte de armas se denomina *Top Lug*, prende a peça principal ao tubo para que não haja movimentos indesejados da peça aquando do regular trânsito de navegação do submarino. Esta imobilização é importante para evitar o desgaste tanto da peça como do tubo e o ruído que possa comprometer a discrição do submarino.

Do SBS apresentado no início do capítulo, esta é a peça que suporta o veículo e, através do sistema *Top Stop*, a peça que imobiliza o sistema de L/R durante o trânsito do submarino.

- O funil;

O objetivo do funil (figura 38) é aumentar a área de aproximação do AUV ao sistema de L/R. De entre as duas plataformas envolvidas no processo de lançamento e recolha, o submarino da classe *TRIDENTE* e o AUV *SEACON*, este último tem uma maior capacidade de manobra e mais rápida capacidade de resposta a ordens de governo por ser mais pequeno e ter um deslocamento menor. No entanto, e como já foi referido nesta dissertação, também pelos mesmos motivos está sujeito a uma maior influência das condições meteoceanográficas. Deste modo, quanto maior for a área de aproximação ao tubo de lançamento de armas disponível para o AUV, maior é o erro admissível dos sistemas de navegação do veículo. Propõe-se que diâmetro do aro exterior (de maior diâmetro) do funil seja 1,5 vezes superior ao diâmetro do tubo, ou seja, 800 mm. O comprimento horizontal do funil deverá ser no mínimo 600 mm para haver espaço de o AUV corrigir a sua trajetória caso toque na extremidade lateral do funil e entrar perfeitamente alinhado no sistema de L/R. O desafio presente neste projeto em relação aos sistemas de L/R de AUVs que utilizam o funil ou cone é a abertura e

---

<sup>27</sup> O sistema *Loading Jack* é a peça que liga o *weapons transport device* aos torpedos e minas.

fecho do funil que será descrito na secção 6.1.

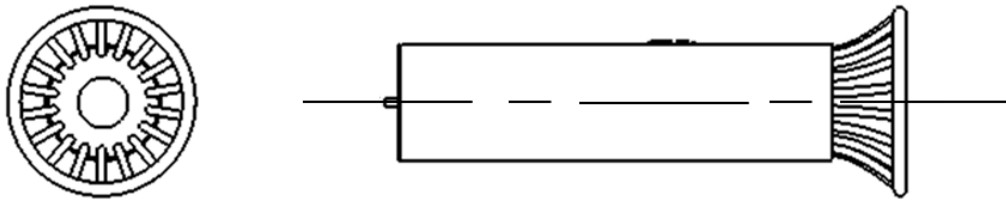


Figura 38 Forma do funil aberto

- A garra mecânica.

Esta peça seria prescindível no caso de o AUV a ser lançado ter um diâmetro superior aos AUVs SEACon e então poder ficar assente nos tubos de polietileno sem que se movimente bruscamente dentro da peça principal durante o trânsito regular do submarino. Contudo os AUVs SEACon têm flutuabilidade positiva quando os sistemas estão todos desligados e como tal, aquando da inundação dos tubos, caso não estejam presos, irão embater na parte superior do tubo peça principal podendo danificar as antenas. A posição longitudinal da garra mecânica na peça principal deve ser cuidadosamente escolhida para não envolver secções do veículo que contenham sensores ou outros sistemas e assim danificá-los. Esta peça é mecânica atuando através de duas rodas dentadas que abrem e fecham as garras. As rodas dentadas, por sua vez, são atuadas por um pequeno motor elétrico que recebe ordem de funcionamento para abrir e para fechar, proveniente de um operador no interior do submarino. Também pode ser atuado através de um sensor de movimento que dá ordem de atuação quando detetar o veículo na posição desejada (previamente calibrado). A figura 39 mostra a garra mecânica proposta.

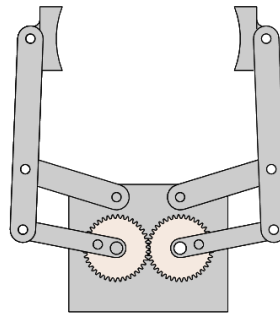


Figura 39 Garra mecânica projetada

#### 5.4. Apresentação de um caso de uso

Acompanhada da descrição narrativa dos processos de lançamento e recolha, vão ser referenciados os requisitos funcionais que serão apresentados no ponto seguinte deste capítulo. Esta apresentação resulta do processo criativo característico de um projeto sem antecedentes de modo a respeitar os constrangimentos previamente apresentados e constituir uma solução para o problema apresentado no capítulo 4. Os RFs-L dizem respeito à fase de lançamento e os RFs-R são os da fase de recolha.

O processo de utilização do sistema proposto inicia-se com o transporte do AUV até à entrada dos tubos de lançamento de armas (RF2.1). Depois de abrir a escotilha de acesso ao interior dos tubos, ou *Bridge door*, o sistema é introduzido no seu interior (RF3.1), já com o AUV fixo ao berço do sistema por uma garra mecânica (RF3.2). Tendo nesta fase o tubo aberto e o sistema que empurra o armamento, ou *Loading Jack*, na sua posição inicial (na extremidade próxima da *Bridge door*), encaixa-se o *Loading Jack* e a peça principal (RF3.3 e 3.4) para que possa haver o transporte desta até à tomada exterior do tubo e no sentido inverso aquando da recolha (RF2.2-L e R). A partir do momento em que o encaixe esteja concretizado, fecha-se a escotilha do tubo e inicia-se a inundação dos tubos de lançamento de armas (RF2.3), através dos comandos do submarino, e em seguida a sua pressurização que é definida em função da profundidade de lançamento (RF2.4). Este processo pode ser monitorizado pelo sistema de gestão da plataforma do submarino e, quando terminado, dá-se ordem para a abertura da tomada de casco de acesso ao exterior do tubo. Caso o sistema seja colocado no tubo de lançamento de armas e o submarino ainda necessite de navegar ou alterar a profundidade até chegar à posição de lançamento do AUV, poderá ser acionado o

sistema *Top stop*. Quando abertas as tomadas de casco, há livre circulação da água entre o tubo e o exterior do submarino. Nesta fase, é dado o comando de ativação de movimento do sistema *Weapons Transport device* até a um ponto designado (RF2.5), próximo da tomada de casco dos tubos. Esta posição é definida em função do comprimento da peça principal para que esta fique sempre em contacto com o tubo de lançamento de armas. O funil abre-se à medida que vai saindo do tubo de lançamento de armas (RF2.6) sendo que esta abertura deve-se aos materiais que o compõem e que será explicada detalhadamente na secção 6.2. Por fim resta ativar a propulsão do veículo através de um comando dado à distância por um operador no interior do submarino (RF2.8).

Considera-se para fase de recolha que as condições iniciais são o submarino na posição *Rendez-vous*, sem propulsão ativada, os tubos de lançamento de armas inundados e o funil aberto tal como foi deixado no final do processo de lançamento. A posição *Rendez-Vous* pode ser a mesma posição do lançamento do AUV ou uma outra próxima da posição de final de missão do AUV, desde que previamente acordada e carregada no sistema do AUV. É de realçar que o sistema de aproximação à posição *Rendez-vous* deverá ter em conta um cálculo prévio do erro de posição do AUV segundo a equação 1.1.

O processo de recolha inicia-se com a aproximação do AUV guiada através de um conjunto de luzes dispostas no aro de maior diâmetro do funil, que permita a aproximação o AUV até ao funil. O veículo navega através de um algoritmo carregado previamente para que este se guie através das luzes (RF2.1). Este requisito poderia também ser satisfeito através de um equipamento acústico compatível com o sistema já existente nos AUVs SEACon. Contudo propõe-se o sistema com luzes para evitar a exposição indesejada do submarino visto que as ondas eletromagnéticas e acústicas são facilmente detetáveis por outros submarinos que se encontrem na mesma área de operações. Nesta fase de aproximação, o funil auxilia a entrada do veículo no sistema de L/R a fim de evitar a colisão entre o submarino e o AUV (RF2.2). A recolha do funil inicia-se quando o veículo estiver já em contacto com a tesoura mecânica (RF3.2), cuja aproximação é efetuada através de um *transponder* acústico LBL compatível com o sistema do AUV, instalado na garra (RF3.1). Esta fase deverá ser monitorizada por uma

câmara instalada no sistema e que está ligada a uma das tomadas laterais dos tubos de armamento que tem ligação com o interior do submarino. O funil é recolhido através do movimento do *weapons transport device* na direção do interior do submarino (RF2.5). Com o berço já recolhido e junto da *bridge door* de acesso ao interior do submarino, fecha-se a tomada de casco do tubo de lançamento de armas, e vaza-se e despressuriza-se os tubos para que possa haver intervenções no veículo já no interior do submarino. O sistema permite que em caso de emergência seja afundado não denunciando deste modo a posição do submarino em ambientes hostis (RF3.10-L e RF3.4-R). Nestes casos, não se dando ordem de paragem ao sistema *weapons transport device*, este irá até ao final do tubo (posição de embarque de torpedos e minas). Nesta posição, dada a geometria da peça principal que é semelhante à das minas utilizada pelos submarinos da classe *TRIDENTE*, esta irá cair devido à ação da gravidade. O cumprimento destes requisitos funcionais está relacionado com a forma da peça principal que contém um furo no prato onde está ligado o funil para que haja livre circulação da água aquando do seu movimento até ao final do tubo de lançamento de armas.

O sistema proposto tem, no entanto dois inconvenientes: no primeiro lançamento de cada missão, o AUV sai do submarino a proa ao exterior. Contudo, como na fase de recolha o submarino entra a popa ao sistema de L/R, os futuros lançamentos passam a ter o AUV a sair de popa para o exterior caso o veículo e o sistema de L/R não sejam intervencionados e o AUV seja recolocado na posição do primeiro lançamento. Esta situação pode ser resolvida bastando programar o veículo antes do início da sua missão para a propulsão, quando ativada, ser a ré; o segundo inconveniente é o facto de este sistema não permitir uma aproximação omnidireccional do veículo ao sistema de L/R o que aumenta a necessidade de precisão dos sistemas de navegação do AUV.

É também importante referir que apesar de a inundação dos tubos de lançamento de armas afetar a estabilidade do submarino, este tem mecanismos e sistemas que permitem compensar o acrescento de caimento que sofre aquando da inundação dos tubos.

A figura 40 mostra o sistema de L/R proposto inserido num tubo. Na mesma é possível observar o tubo de lançamento de armas (nº1), o funil (nº2) e a peça principal ao corte (nº3).

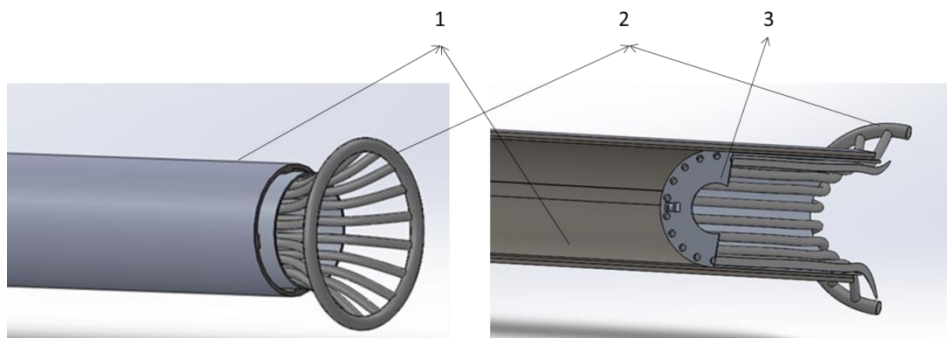


Figura 40 Sistema de L/R proposto dentro do tubo de lançamento de armas

### 5.5. Refinamento da solução proposta

Quando confrontada a solução proposta (numa fase conceptual) com um tubo de lançamento de armas dos submarinos da classe *TRIDENTE*, verificando-se que a solução não era indicada visto que o funil dispõe de um equipamento em tensão constante para abrir à medida que vai saindo do tubo de lançamento de armas, o que implica que o aro de maior diâmetro esteja deformado quando dentro do tubo. No entanto, o tubo de lançamento de armas tem quatro calhas na qual assentam tanto os torpedos como as minas aquando do seu lançamento. Essas quatro calhas vão constituir quatro pontos de apoio (igualmente distanciados) onde assenta o aro de maior diâmetro do funil, pelo que ao estar em tensão constante, não deverá manter a deformação esperada e poderá ficar preso em sistemas que estão instalados nos tubos de lançamento de armas, posicionados entre cada calha.

Como tal, torna-se necessário adaptar o sistema anteriormente desenvolvido aos submarinos da classe *TRIDENTE*, podendo o sistema já proposto constituir um ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema de lançamento e recolha através de navios de superfície.

A diferença no projeto passa por retirar os furos de ligação ao funil da peça principal e por criar uma segunda peça (secundária) semelhante à peça principal mas sem o encaixe para o *mine coupling* e sem o sistema *Top Stop*. Deste modo, a peça principal passa a ter uma peça de igual forma inserida em que é esta segunda que contém o funil. A peça principal é posicionada até que o extremo esteja na posição do casco hidrodinâmico, com a peça secundária e o funil recolhido. Na altura de abrir o

funil para lançar o AUV, a peça secundária é empurrada de modo que a sua extremidade oposta à do encaixe fique no limite da peça principal na superfície do casco hidrodinâmico. Esta operação é realizada por um atuador que é acionado por um motor elétrico e empurra a peça que contém o funil (secundária), abrindo o funil para fora da peça principal nos mesmos moldes já descritos no ponto 5.3. O atuador será colocado no interior da peça principal mas fora da peça secundária para permitir empurrar e puxar a mesma. No entanto, a instalação do atuador deverá ter em conta a deslocação do centro de massa para próximo da ligação com o *weapons transport device*. A posição do centro de massa deverá ser ligeiramente afastada da superfície de ligação para garantir o afundamento, por ação da gravidade, do sistema de L/R em caso de emergência. Com o atuador, é resolvido o problema dos quatro apoios nas calhas equidistantes dos tubos de lançamento de armas. O processo de recolha ocorre de modo inverso, quando o AUV entrar na peça que contém o funil, utilizando o mesmo algoritmo de aproximação ótico, e estiver preso nas garras mecânicas, o atuador funciona em sentido inverso e recolhe a peça secundária e conseqüentemente o funil. Só após o fecho do funil é recolhida a peça principal para o interior do tubo de lançamento de armas no torpedo através do *weapons transport device*.

Apresenta-se de seguida, a decomposição funcional do sistema de lançamento (figura 41) e do sistema de recolha (figura 42), bem como as respetivas matrizes de projeto. A necessidade de uma nova decomposição funcional deve-se ao acrescento de requisitos funcionais ao sistema anteriormente proposto, que levaram à formulação de novos PPs descritos no parágrafo anterior.

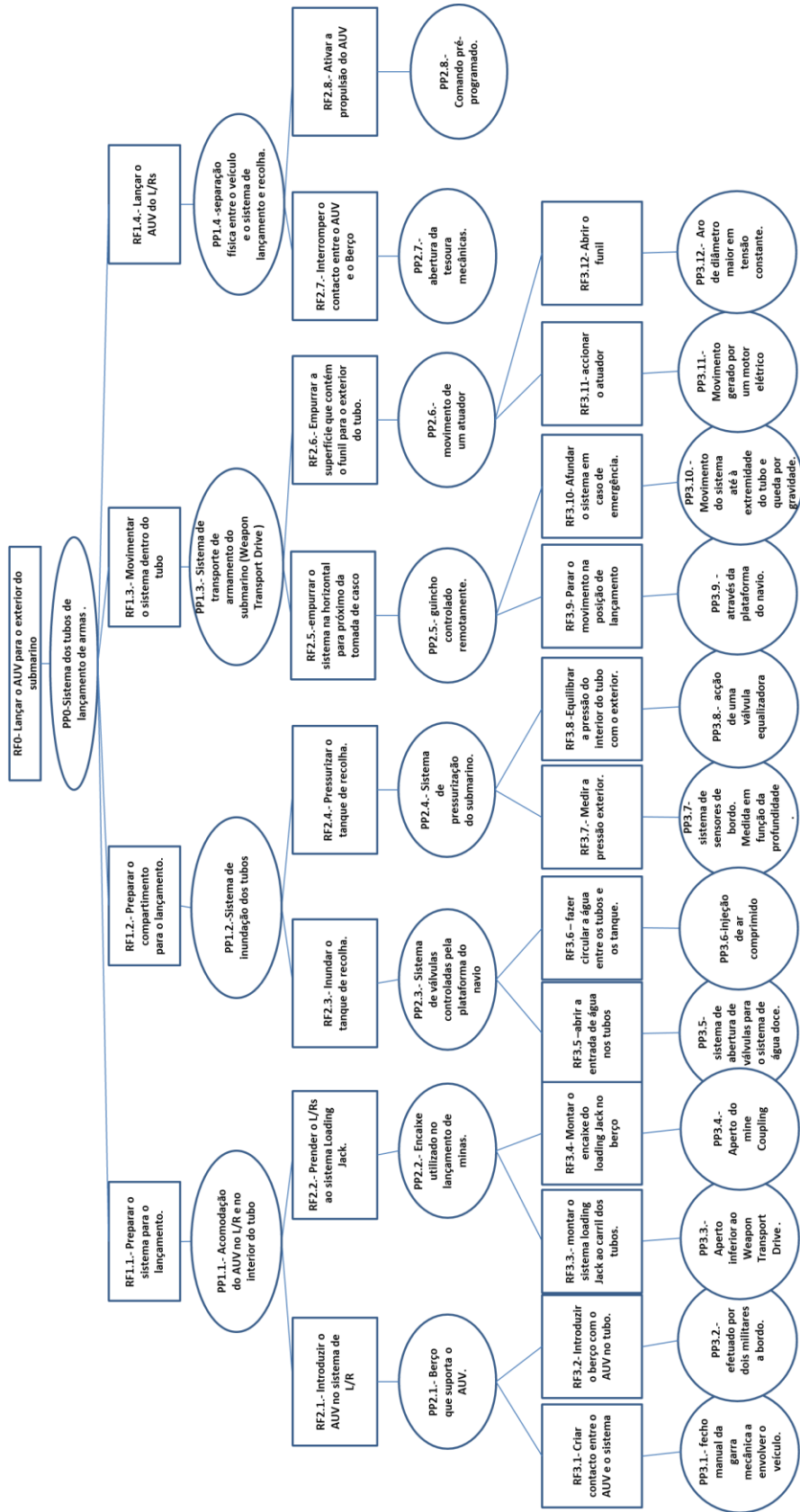


Figura 41 Decomposição funcional do sistema de lançamento para os submarinos



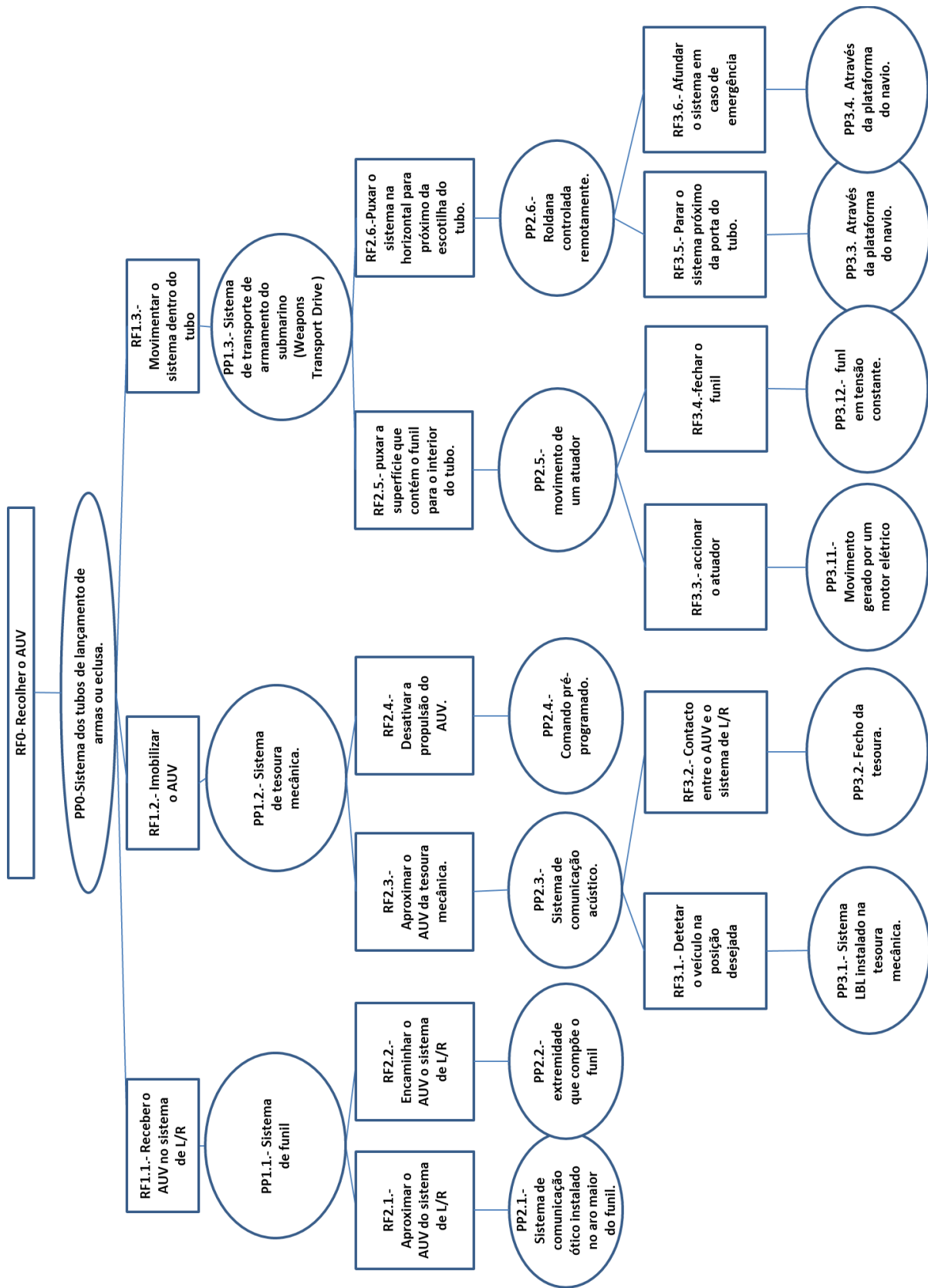


Figura 42 Decomposição funcional do sistema de recolha para os submarinos

$$\begin{array}{l}
 \left[ \begin{array}{l}
 RF0 \\
 RF1.1 \\
 RF1.2 \\
 RF1.3 \\
 RF2.1 \\
 RF2.2 \\
 RF2.3 \\
 RF2.4 \\
 RF2.5 \\
 RF2.6 \\
 RF3.1 \\
 RF3.2 \\
 RF3.3 \\
 RF3.4 \\
 RF3.5 \\
 RF3.6
 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cccccccc}
 X & & & & & & & \\
 & X & & & & & & \\
 & s & X & & & & & \\
 & s & s & X & & & & \\
 & & & X & & & & \\
 & & & X & X & & & \\
 & & & s & s & X & & \\
 & & & s & s & s & X & \\
 & & & s & s & s & s & X \\
 & & & s & s & s & s & X \\
 & & & & & X & & \\
 & & & & & X & X & \\
 & & & & & s & s & X \\
 & & & & & s & s & X & X \\
 & & & & & s & s & s & s & X \\
 & & & & & s & s & s & s & X
 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{l}
 PP0 \\
 PP1.1 \\
 PP1.2 \\
 PP1.3 \\
 PP2.1 \\
 PP2.2 \\
 PP2.3 \\
 PP2.4 \\
 PP2.5 \\
 PP2.6 \\
 PP3.1 \\
 PP3.2 \\
 PP3.3 \\
 PP3.4 \\
 PP3.5 \\
 PP3.6
 \end{array} \right] \quad (\text{eq. 5.4})
 \end{array}$$

Da análise da equação 5.4 e da figura 42, o sistema é também desacoplável, à semelhança da fase de lançamento. Os RFs acrescentados em relação ao sistema de recolha proposto no ponto 5.2 foram os RFs 2.5, 3.3 e 3.4. O RF 3.4- fechar o funil- depende diretamente e mecanicamente do RF3.3- movimento do atuador, à semelhança do que acontece no sistema de lançamento com a abertura do funil. As restantes dependências visíveis e assinaladas na matriz de projeto são concordantes com o sistema de lançamento proposto anteriormente pelo que se dispensa a descrição exaustiva.

O atuador pode ser mecânico ou óleo-hidráulico. No caso de ser mecânico poderá ser um parafuso rosca sem-fim. Neste caso, como o parafuso roda para gerar movimento, a peça secundária obrigatoriamente terá que rodar também acompanhando este movimento. Para colmatar este facto terão que ser colocadas guias encaminhadoras da peça secundária para esta não rodar dentro da peça principal. O parafuso rosca sem-fim tem como desvantagem a possível geração de ruído desnecessário e comprometedor da discríção do submarino aquando do seu funcionamento. No caso de o atuador ser óleo-hidráulico, um êmbolo por exemplo, o problema do ruído é minimizado, contudo o êmbolo terá que garantir o funcionamento numa pressão de 10 bar e esta solução ocupará mais espaço na peça principal para conter um reservatório de óleo alimentador do êmbolo. A escolha do melhor atuador a aplicar no sistema depende do desenvolvimento deste projeto a níveis de decomposição menores. Poderá ter ainda em

conta testes experimentais na área da acústica submarina, que não foram efetuados na presente dissertação, ficando assim como proposta de trabalho futuro no capítulo 7.

Na figura 43 é apresentado em corte, o sistema proposto para os submarinos da classe *TRIDENTE*.

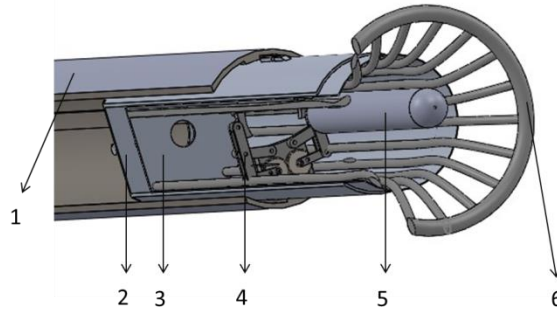


Figura 43 Sistema (em corte) proposto para os submarinos

O nº1 na figura representa o tubo de lançamento de armas, o nº 2 a peça principal, o nº 3 a peça secundária, o nº 4 é a garra mecânica, o nº 5 o AUV (com o mesmo diâmetro dos AUVs SEACon) e o nº 6 o funil aberto. Note-se que na figura 42, sensivelmente metade da peça principal está fora do tubo o que não representa a posição desta peça nem na fase de lançamento nem na de recolha. Em ambas, a extremidade da peça principal é coincidente com a extremidade das calhas equidistantes que terminam no casco hidrodinâmico do submarino (final do tubo de lançamento de armas). A posição das diferentes peças do sistema nesta imagem é apenas para facilitar a compreensão do sistema de L/R projetado.

## **6. Análise e estudos experimentais do sistema de L/R proposto**

### **6.1. Estudos experimentais do conceito proposto**

No presente capítulo é apresentada a análise do sistema proposto que resulta dos parâmetros de projeto definidos no capítulo anterior. É também apresentada e mostrada uma proposta do dimensionamento efetuada com recurso a expressões matemáticas que modelam o comportamento de pratos circulares sujeitos a cargas e com recurso à utilização do método de elementos finitos (MEF) através do SolidWorks 2017. O método dos elementos finitos utiliza um conjunto de elementos, ou malha, de comportamento bem definido para modular e fazer aproximações sucessivas ao comportamento de um corpo com várias variáveis desconhecidas (Dias et al 2010).

Para testar o funcionamento do conceito proposto foram construídos dois protótipos no Arsenal do Alfeite, SA (AA) e na oficina da Escola Naval. Os protótipos construídos simulam o funcionamento do sistema proposto através de testes efetuados no Arsenal do Alfeite, SA e no Laboratório de Arquitetura Naval da Escola Naval.

#### **6.1.1. Descrição dos dois protótipos**

A construção deste modelo não respeita uma escala pois foi construído com material excedente disponível no AA. Para simular o tubo de lançamento de armas foi cortado um tubo em PVC com 191 mm de diâmetro e 1 m de comprimento. Foi construído também um prato de alumínio com 190 mm de diâmetro externo de modo a simular a peça principal.

No primeiro protótipo, foram feitos doze furos no prato, igualmente espaçados, com 3 mm de diâmetro e com uma inclinação de  $75^\circ$  em relação ao prato. Nos furos foram coladas varetas de fibra de carbono com 3 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento. Devido à inclinação dos furos, as varetas logo que na posição, adquirem a forma de um funil. Quanto ao aro de maior diâmetro foi passado um fio multifilar de pesca na extremidade das varetas que não estão ligadas ao prato (figura 44).

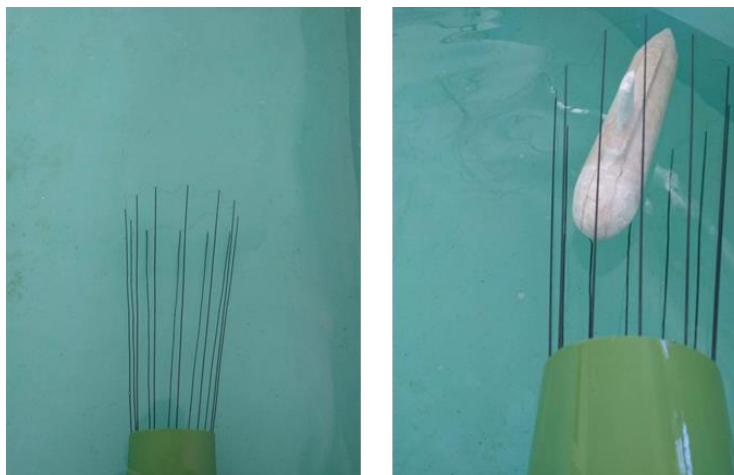


Figura 44 Protótipo 1

A alteração do segundo protótipo (figura 45) em relação ao protótipo anteriormente descrito prende-se com a utilização de tubos de polietileno para constituir o funil e de um aro de aço mola como o aro de maior diâmetro do funil. O funil é composto por oito tubos de polietileno de baixa-densidade de 4 mm de diâmetro (por não haver tubos de alta densidade para diâmetros inferiores a 16 mm disponíveis no mercado), igualmente espaçados e colados ao prato. Na extremidade de cada tubo encaixa uma peça em “T” por onde passa o aro de maior diâmetro do funil. Este aro é constituído de um material vulgarmente conhecido por “corda de piano” com 0,8 mm de diâmetro. Para conferir maior robustez, utilizou-se um molde de madeira maciça para que o aro de maior diâmetro fosse composto por quatro voltas do aço-mola e aumentar a rigidez a fim de evitar deformações permanentes aquando da abertura e fecho sucessivos no funil.

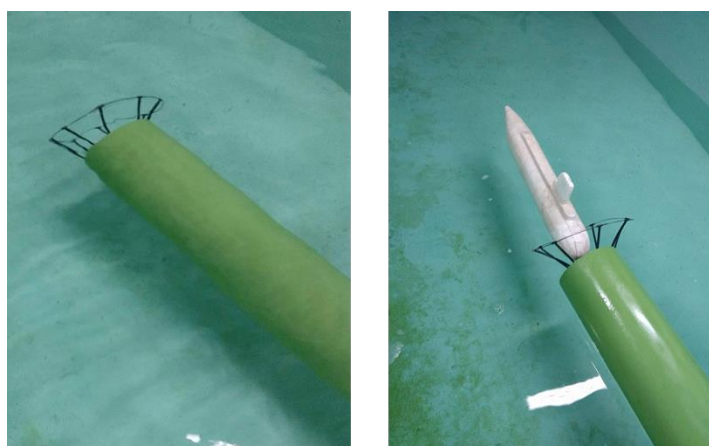


Figura 45 Protótipo 2

### 6.1.2. Discussão dos resultados

A experiência consistiu em 25 diferentes ensaios, cujos resultados foram registados na seguinte tabela 6.

Nos primeiros cinco ensaios, realizados fora de água foi utilizado um dinamómetro que mediu a força necessária para puxar o prato de alumínio de modo às varetas deformarem como esperado. O valor medido foi sempre próximo de 85 N no primeiro protótipo e de 33 N no segundo protótipo. Nos restantes ensaios, que foram realizados num tanque de água doce não foi utilizado o dinamómetro. Assumindo que a constante de atrito no sistema não se altera e que a constante da mola também é a mesma, estima-se que no sistema *Weapons Transport Device* necessite de provocar uma forma de tração de sensivelmente 110 N para fechar o funil. Esta força não excede a carga normal do sistema que está explicada na secção 6.3.

Tabela 6 Resultados do estudo experimental

	Nº de ensaios	Nº de sucessos na abertura do funil	Nº de sucessos no fecho do funil	Nº de deformações detetadas no funil quando aberto
Protótipo 1	25	25	25	0
Protótipo 2	25	25	25	2

A actividade experimental comprova que, conceptualmente, o primeiro sistema funciona como esperado no que diz respeito à abertura e fecho do funil. Tal como esperado, o funil abre muito próximo da extremidade do tubo. Isto acontece porque os furos com inclinação onde encaixam as varetas estão próximos da extremidade do prato, mas num sistema à escala real, não haveria espaço para a entrada do AUV na peça a não ser que o funil iniciasse a recolha enquanto o AUV entrasse no sistema o que iria provocar acoplamentos.

No estudo com o segundo protótipo, o inconveniente foi a utilização de tubos de polietileno de baixa densidade pois são mais deformáveis e devido a isso os tubos não

estão dispostos paralelamente ao tubo quando o funil está fechado. No entanto o funil abre por ação da mola assim que o aro de maior diâmetro deixa de estar em contacto com o tubo, empurrado pela força aplicada no prato. Curiosamente a força necessária para fechar o funil é menor neste sistema do que no primeiro, embora esta intensidade varie em função da constante de elasticidade do material adoptado na construção do aro de maior diâmetro. Os dois últimos ensaios revelaram uma deformação no aro de maior diâmetro do funil quando aberto mas devido ao facto de as peças em “T” de dois tubos terem deslizado por má ligação deixando os tubos de estar igualmente espaçados.

Deste modo, propõe-se que o funil seja composto de tubos de polietileno de alta densidade, o mesmo material utilizado pelo *WHOI* no *MBARI Docking Station* já mencionado no capítulo 2, tendo este dado sido obtido por contacto direto para com o gabinete que desenvolveu o projeto.

Os tubos de polietileno estão dispostos ao longo de toda a peça principal e conectadas à peça principal através de flanges electro soldáveis de diâmetro exterior também de 32 mm que é uma das dimensões disponíveis no mercado. O polietileno permite que haja contacto entre o funil e o AUV sem causar quaisquer danos no veículo.

O aro de diâmetro maior do funil é então feito num material conhecido como arame de aço- “corda de piano”. Este material é bastante flexível e permite uma fácil deformação. A conexão entre os tubos de polietileno e o aro de diâmetro maior do funil pode ser feito através de peças de polietileno em formato “T” que na extremidade perpendicular às outras duas extremidades é ligada ao tubo de polietileno permitindo então, nas restantes duas, a passagem do arame de aço.

Sendo estes materiais deformáveis, o conceito proposto utiliza o *weapons transport device* para abrir e fechar o funil. Com o funil fechado, antes do lançamento do veículo, o aro de maior diâmetro do funil encontra-se deformado dentro do tubo de lançamento de armas. À medida que o *weapons transport device* exerce a força na peça principal para a movimentar no tubo de lançamento de armas e que o funil deixa de estar em contacto com o tubo, o aro de diâmetro maior do funil adota a sua forma circular sem deformações. Para recolher o funil acontece o inverso em que quando o *weapons transport device* puxa a peça principal para o interior do tubo, o funil (primeiro

os tubos de polietileno e depois o aro de diâmetro maior) quando em contacto com o tubo deforma-se. Esta deformação implica que a força aplicada à peça principal seja maior pois o arame aço comporta-se como uma mola.

## **6.2. Seleção dos materiais a utilizar no sistema de L/R de AUVs**

A escolha dos materiais a utilizar no projeto é de extrema importância devido ao meio no qual o sistema de lançamento e recolha opera. Como sistema de apoio à decisão, é utilizado o *Software* CES EduPack 2010, desenvolvido pela companhia britânica GRANTA. Este *software* contém uma base de dados de materiais de engenharia e elementos da tabela periódica e das suas propriedades. Através de uma outra base de dados do conjunto de parâmetros físicos e químicos a que os materiais podem estar sujeitos, o CES EduPack permite comparar em gráficos de medidas qualitativas ou quantitativas o comportamento dos diversos materiais em estudo. Desta forma, permite obter conclusões sobre quais os materiais que melhor se adaptam às solicitações físicas e químicas de um ambiente quando cruzados os resultados das várias comparações entre materiais.

Foram desenvolvidos dois estudos diferentes neste *software*: um estudo de materiais a utilizar na peça principal e secundária e um segundo estudo de tratamentos de superfície.

### **6.2.1. Estudo 1- Material da peça principal**

Os parâmetros a ter em consideração para este estudo e que serão importantes para reduzir a base de dados de materiais são apresentados de seguida com a ordem de importância assinalada.

#### **1. Comportamento em água salgada (resistência à corrosão)**

A corrosão é uma reação de oxidação- redução que pode ser acelerada pelo contacto da superfície com água salgada devido à maior facilidade de migração de elementos carregados num meio condutor (corrosão galvânica). Ao existir um diferente teor de iões em solução, existe também uma diferente condutividade da corrente elétrica e, assim, se conclui que uma solução de água com maior salinidade (maior teor em

iões), tem maior capacidade condutividade elétrica. A resistência à corrosão pode no entanto ser aumentada quando aplicadas proteções catódicas, como por exemplo a tinta. Neste parâmetro o CES EduPack 2010 classifica o comportamento dos materiais em água salgada conforme a tabela 7.

Tabela 7 Classificação dos materiais na resistência à água salgada

Classificação	Descrição
Inaceitável	O material não deve ser utilizado sem proteção catódica.
Uso limitado	Não é recomendada a aplicação do material, podendo ser aceitável para aplicações de curto prazo.
Aceitável	Pode requerer proteção catódica adicional.
Excelente	Não é expectável degradação do material em aplicações a longo-prazo.

## 2. Resistência ao desgaste

O material deve ser resistente às solicitações que possam ocorrer durante todo o ciclo de vida do sistema. No caso do sistema em estudo, a solicitação será o deslize do berço nas calhas do tubo de lançamento de armamento do submarino. O deslize pode ter como consequência o desgaste tanto das calhas como do berço que com ele contacta. É também importante considerar que este efeito é mais acentuado na calha inferior pois o berço terá que suportar uma carga (o AUV). Deste modo torna-se adequado considerar para o estudo deste parâmetro a dureza de *Vickers*. A dureza mede a resistência de um material à aplicação de uma força compressiva que possa causar deformações. A dureza de *Vickers* resulta de um ensaio em que um diamante com forma piramidal e dimensões conhecidas é comprimido contra a superfície de um material. A força de compressão aplicada é conhecida e através da medição da área da superfície impressa pelo diamante no material calcula-se a dureza do material. As unidades de medida da dureza são o *MPa*, pelo facto de esta grandeza estar relacionada com a tensão de cedência ou *Yield Strength*<sup>28</sup>, ou no caso da dureza de *Vickers* o *kg/mm<sup>2</sup>*. Uma consideração importante é o facto da dureza de *Vickers* ter de ser inferior à do material dos carris para que o

<sup>28</sup> Limite do domínio elástico do material, ou seja, tensão a partir da qual o material começa a deformar-se no domínio elástico.

desgaste ocorra preferencialmente no sistema de lançamento e recolha. Esta consideração é importante pelo facto de ser mais fácil intervencionar o sistema amovível do que os carris fixos dos tubos de lançamento de armas.

### 3. Tensão de cedência

A tensão de cedência representa o valor a partir do qual, o material não respeita a lei de *Hook* e inicia a deformação plástica. Este valor é diferente no caso da força aplicada ser de tração ou de compressão, no entanto, para os metais, a diferença é desprezível. Este parâmetro é expresso em mega Pascal ou *MPa*.

### 4. Tenacidade

A tenacidade representa a capacidade de um material com uma fenda resistir à fratura, ou seja, qual a quantidade de energia que o material pode absorver até à propagação da mesma fenda. A sua medição é feita através da aplicação de uma carga de tração conhecida, a uma amostra de material que contenha uma fenda de dimensões conhecidas (anteriormente medidas). Ao variar a carga aplicada, regista-se o valor ao qual a fenda se propaga e calcula-se a tenacidade que é expressa em mega Pascal (*MPa*).

### 5. Peso específico

O peso específico é o peso por unidade de volume. É importante considerar este parâmetro pois pretende-se que o sistema seja removível dos tubos de lançamento de armas por elementos da guarnição do submarino. Assim, o peso do sistema deverá ser suportável por duas pessoas o que constitui um dos constrangimentos do projeto. O peso específico é expresso quantitativamente em quilograma por metro cúbico ( $kg/m^3$ ).

### 6. Custo

A relação custo de aquisição/ custo de manutenção deve ser tida em conta na escolha do material visto que a manutenção é fundamental durante o ciclo de vida do sistema para colmatar os efeitos de corrosão e possíveis deformações por fadiga que afetem a eficiência dos processos de lançamento e recolha dos AUVs. Ao contrário dos parâmetros anteriores, este varia com o tempo influenciado por fatores como a inflação

e a especulação. Para além disso, existem três intervenientes que são o fabricante, o distribuidor e o vendedor. A base de dados do Ces EduPack é atualizada regularmente, contudo devido à variação de preço diária os valores apresentados representam aproximações médias. O parâmetro do preço é expresso em euros por kilograma ( $\text{€/kg}$ ).

O programa, para a escolha de materiais a utilizar, apresenta uma base de dados de três níveis em que a diferença é o número de materiais apresentados. Para esta pesquisa, foi utilizado o nível três que contém a base de dados mais alargada e completa com 2954 materiais.

Durante a utilização deste sistema de apoio à seleção de materiais, inseriu-se os parâmetros em estudo nos diferentes estágios de comparação com base nas prioridades de parâmetros definidas anteriormente e, à passagem de um estágio para o seguinte, limitou-se o espectro de materiais. Os estágios são uma ferramenta do programa que permite que a redução da base de dados seja feita através da inserção de dois parâmetros de cada vez e dos seus respetivos limites num só gráfico. Note-se que os eixos dos gráficos em seguida apresentados estão à escala logarítmica. Os materiais são todos apresentados no gráfico do respetivo estágio sendo que estão assinalados com cores os que respeitam os limites estabelecidos e a cinzento os que não respeitam.

No estudo da escolha do material para o prato/berço, no estágio 1 (figura 46) os parâmetros em estudo formam o comportamento em água salgada no eixo das abcissas e a dureza de *Vickers* no eixo das ordenadas. Os limites introduzidos no parâmetro da água salgada foram o domínio do comportamento aceitável e excelente e no parâmetro da dureza de *Vickers* entre os 10 e os 55VH. O limite dos 55VH teve em conta que as calhas dos tubos de lançamento de armas são de um material plástico endurecido e composto por fibra de vidro não especificado. Deste modo, depois de analisar os valores da dureza de *Vickers* dos materiais de fibra de vidro contemplados na base de dados do *CES EduPack* limitou-se como valor máximo do estudo os 55VH para salvaguardar o constrangimento já mencionado do desgaste ocorrer na peça principal e não nas calhas do tubo de lançamento de armas. Na figura 45 os limites dos parâmetros estão representados pelo retângulo assinalado como número 1.

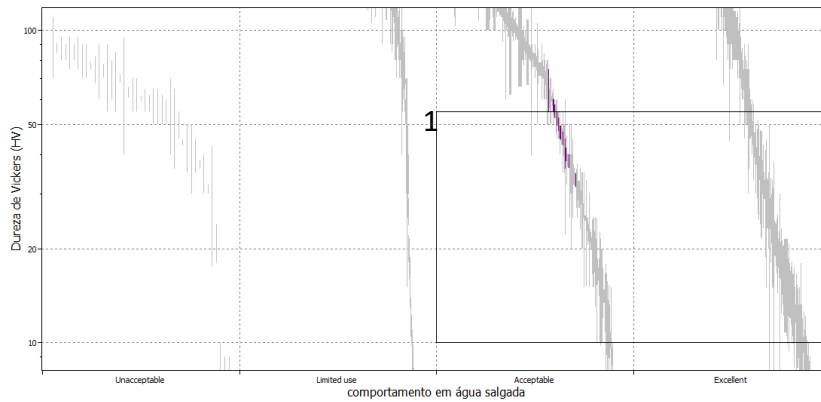


Figura 46 Estágio 1- escolha do material

No estágio 2 (figura 47), relacionou-se os parâmetros da tensão de cedência no eixo das abcissas e da tenacidade no eixo das ordenadas. Os limites considerados para a tenacidade entre os 20 MPa e os 100 MPa para haver uma tolerância de projeto em vinte vezes superior à pressão exercida no sistema à cota máxima de operação do AUV (100 m). Relativamente à tensão de cedência limitou-se entre os 100 MPa e os 1000 MPa sendo que o valor inferior do intervalo considerado permite uma larga tolerância à deformação e rutura tendo em conta as solicitações esperadas.

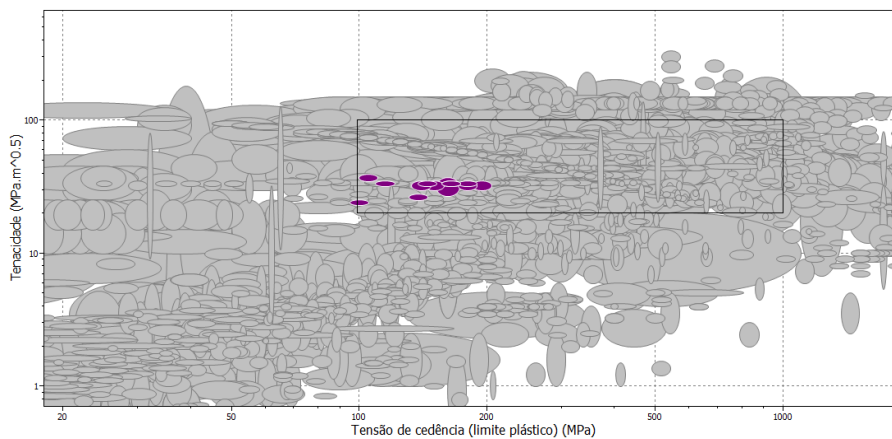


Figura 47 Estágio 2-escolha do material

Por fim relacionou-se a densidade o custo no estágio 3 (figura 48). Ao custo aplicou-se a limitação superior de 3 €/kg e inferior de 1€/kg. Relativamente à densidade limitou-se entre os 1000 kg/m<sup>3</sup> devido à necessidade de flutuação negativa e os 3000 kg/m<sup>3</sup> para cumprir com o constrangimento 10 apresentado no capítulo 4.

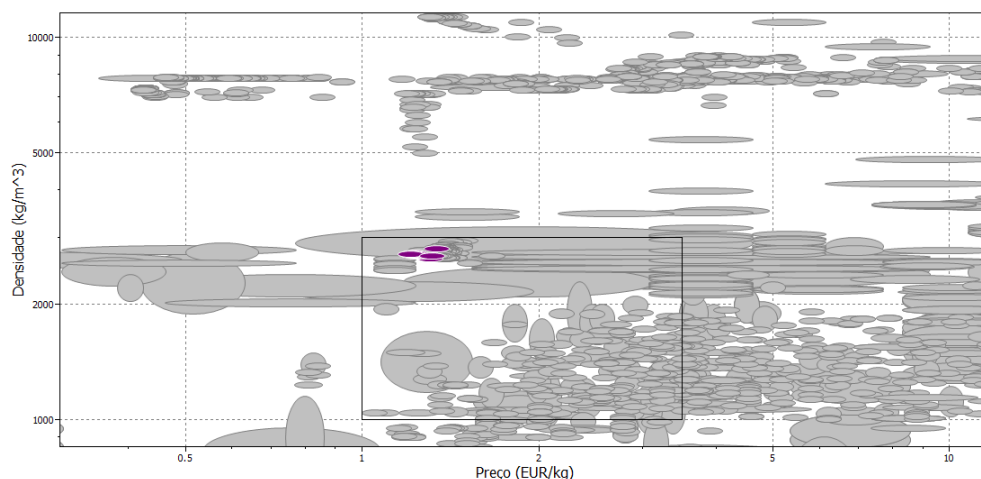


Figura 48 Estágio 3- escolha do material

Dos 2954 materiais considerados no início do estudo, reduziu-se a base de dados para 13 materiais, todos alumínio (assinalados com cor roxa na figura anterior). O material recomendado é o Alumínio 7075-T0 (cuja ficha técnica se encontra em anexo A) por ser o material com menor rigidez de entre os obtidos.

### 6.2.2. Estudo 2- Tratamento de superfície

Os parâmetros a ter em consideração para o estudo do tratamento de superfície a aplicar ao material escolhido e que serão importantes para reduzir a base de dados de materiais são os seguintes:

1. Resistência ao desgaste;
2. Proteção à corrosão (em ambiente aquático);
3. Rugosidade da superfície;
4. Dureza da superfície;

A aplicação destes parâmetros tem em conta a superfície cilíndrica da peça principal, que contacta diretamente com os tubos de lançamento de armas e a superfície cilíndrica da peça secundária, que contacta com a primeira.

No estudo do tratamento de superfície a base de dados inicial apresentada pelo *software* é de quarenta e seis processos. No estágio 1 relacionou-se a proteção à corrosão no eixo das ordenadas com a resistência ao desgaste no eixo das abcissas. Ambos os parâmetros são qualitativos em verdadeiro ou falso, ou seja se os processos

de tratamento da superfície garantem ou não o parâmetro escolhido. Neste estágio os únicos processos que garantem a proteção à corrosão e a resistência ao desgaste são a anodização e a galvanização.

No estágio 2 (figura 49) relacionou-se a rugosidade da superfície no eixo das ordenadas com a dureza da superfície no eixo das abcissas. O parâmetro da rugosidade é dividido em classes (A, B e C em que A é muito suave<sup>29</sup>) e o parâmetro da dureza é apresentado em Vickers (VH). Foi limitado o parâmetro da rugosidade apenas à classe A pois quanto mais suave é a superfície de um material, menor as irregularidades de superfície que causam desgaste ou riscos indesejados nas superfícies que as quais este contacta. A dureza da superfície foi limitada entre os mesmos valores que no estudo da escolha do material, ou seja entre os 10 e os 55VH.

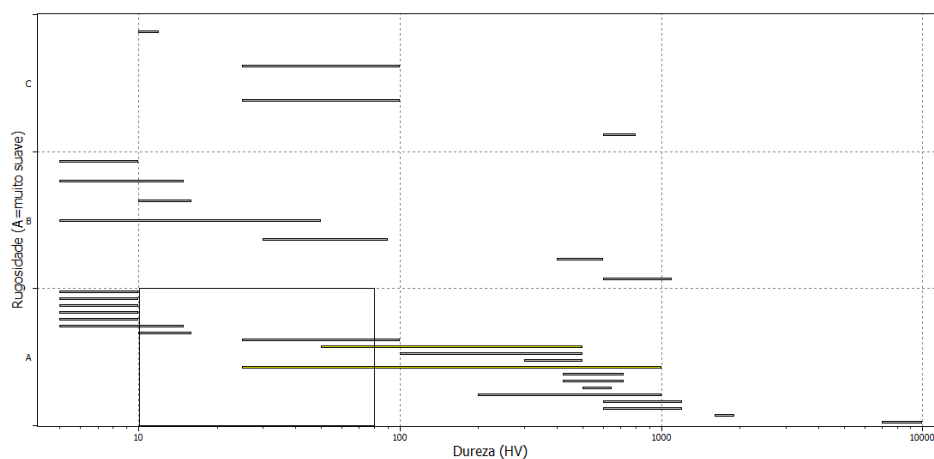


Figura 49 Estágio 2- tratamento de superfície

Os resultados obtidos deste segundo estudo culminaram na anodização e galvanização. A anodização é um processo em que se forma um filme protetor através de um óxido do próprio metal, isto é, o processo de corrosão acontece no filme protetor e não no material a proteger aumentando, assim, a sua durabilidade. A galvanização por sua vez é um processo mais caro e consiste na imersão do material a proteger numa solução de outro material em fusão (por exemplo Zinco). Assim forma-se uma camada superficial com um material mais resistente à corrosão. Para o presente estudo considera-se como tratamento de superfície preferencial a anodização por ser mais

<sup>29</sup> A rugosidade representa as irregularidades da superfície. É apresentado o valor eficaz ou *RMS*(*Root Mean Square*) e quanto menor é o valor RMS das irregularidades, mais suave é a superfície.

comum em alumínio.

Estes dois resultados poderão também ser aplicados ao aço mola do aro de maior diâmetro do funil pois o aço é um material que é bastante afetado pela corrosão.

O estudo apresentado permite verificar que o material escolhido respeita o constrangimento definido acerca do desgaste do tubo de lançamento de armas. A superfície dos torpedos disparados pelos submarinos da classe *TRIDENTE* é também em alumínio anodizado, o que permite validar o estudo efetuado.

### 6.3. Dimensionamento da peça principal

Os cálculos efetuados no presente capítulo encontram-se em Apêndice A tendo sido efetuados com recurso ao *MathCad 2015*.

Young & Budynas, 2002 definem um conjunto de expressões para pratos circulares planos com espessura constante que foram utilizadas para calcular a espessura mínima da peça principal tendo em conta as cargas a que está solicitada. As expressões para o caso da figura 50 foram calculadas encontram-se apresentadas em apêndice A.

Apesar de não haver normas classificadores que recomendem o coeficiente de segurança a utilizar em estruturas de submarinos, o Dr. David Andrews, Arquiteto Naval professor do *University College London* recomenda a aplicação de um coeficiente de segurança 4. Este valor é aplicado à tensão de cedência (característico do material) em todos os cálculos futuros.

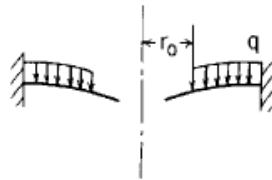


Figura 50 Caso e restrições de fronteira aplicadas nas simulações<sup>30</sup>

Para comparar os cálculos analíticos e os cálculos computacionais foi calculada a deflexão máxima de um prato de alumínio 7075-T0 com diâmetro externo de 533 mm,

<sup>30</sup> Retirado de Young & Budynas, 2002

diâmetro interno de 203 mm, espessura de 10 mm, fixo na superfície exterior e livre na interior (figura 50). É apresentado na figura 51 um exemplo da simulação efetuada em conformidade com as fronteiras do diagrama da figura 50 e aplicando a carga distribuída. A malha utilizada nas simulações foi sempre a mesma contendo 7623 elementos. O desvio ( $\delta$ ) entre as simulações computacionais e o cálculo analítico, foi calculado através da expressão 6.1:

$$\delta_{\text{cálculo}} = 1 - \frac{\text{cálculo computacional}}{\text{cálculo analítico}} \times 100 \text{ (eq. 6.1.)}$$

Tabela 8 Comparação de resultados analíticos e computacionais

<b>Carga distribuída</b>	<b>Cálculo analítico da deflexão (m)</b> $y = \frac{q \times r_e}{D} \times \left( \frac{C_1 \times L_{14}}{C_4} - L_{11} \right)$	<b>Cálculo computacional da deflexão (m)</b>	<b>Desvio (%)</b> <b>(eq. 6.1)</b>
<b>1000 N/m<sup>2</sup></b>	$5,949 \times 10^{-6}$	$5,896 \times 10^{-6}$	0,89
<b>2000 N/m<sup>2</sup></b>	$1,19 \times 10^{-5}$	$1,179 \times 10^{-5}$	0,92
<b>3000 N/m<sup>2</sup></b>	$1,785 \times 10^{-5}$	$1,769 \times 10^{-5}$	0,90
<b>4000 N/m<sup>2</sup></b>	$2,379 \times 10^{-5}$	$2,358 \times 10^{-5}$	0,88
<b>5000 N/m<sup>2</sup></b>	$2,974 \times 10^{-5}$	$2,948 \times 10^{-5}$	0,87
<b>6000 N/m<sup>2</sup></b>	$3,569 \times 10^{-5}$	$3,537 \times 10^{-5}$	0,90

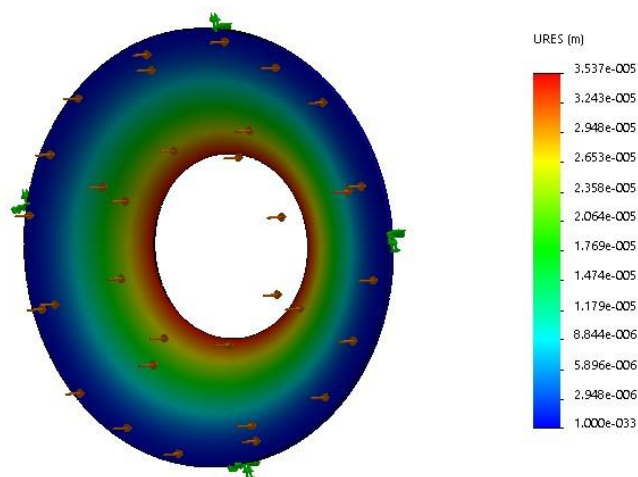


Figura 51 Prato utilizado na simulação para comparar com os cálculos analíticos.

Através dos resultados demonstrados na tabela 8, a ferramenta de simulação do SolidWorks 2017 permite aproximações com um erro bastante aceitável aos resultados obtidos analiticamente o que permite atestar da bondade de cálculo do *software* e do modelo definido.

As minas Murena, utilizadas pela Marinha Portuguesa nos submarinos da classe *TRIDENTE* pesam aproximadamente 780 kg segundo o catálogo do fornecedor (classificado). Sendo que o sistema *Weapons Transport Device* tem capacidade para empurrar/puxar duas minas no máximo, considerando um coeficiente de atrito entre o alumínio e as calhas dos tubos de lançamento de armas de 0,2 (Benabdallah, 2007) e considerando uma área do prato de  $0,1816 \text{ m}^2$  (calculada em apêndice), a carga  $q$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) considerada nas simulações em SolidWorks será calculada na expressão 6.2:

$$q = \frac{2 \times 7800}{0,1816} \times 0,2 = 1,718 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}^2 \text{ (eq. 6.2)}$$

Equação 6.1- Cálculo da carga a considerar nas simulações

Tendo em conta estes valores e considerando as dimensões da peça principal já enunciadas, a espessura mínima da peça deverá ser  $5,253 \text{ mm}$  (conforme cálculos em apêndice). Tendo em conta os perfis cilíndricos disponíveis no mercado, foi escolhida uma espessura, por excesso, de 10 mm para a peça.

Para prever este cálculo foi também desenhado um gráfico com recurso ao *software MathCad 2015* que demonstra qual a espessura mínima a considerar para o

projeto em função da carga aplicada pelo *weapons transport device* (figura 52). Este gráfico é importante pois aquando do teste experimental do projeto, pretende-se medir a força ou carga exercida na peça principal e caso o valor medido através de um dinamómetro seja superior ao estimado, pode saber-se expeditamente qual a espessura mínima da peça para suportar essa mesma carga.

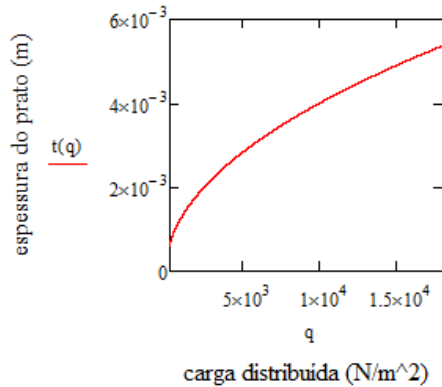


Figura 52 Espessura mínima da peça em função da carga distribuída aplicada

Deste modo foi feita uma simulação em SolidWorks (figura 53) ao mesmo prato mas já com os furos para o encaixe do funil com uma malha de 7587 elementos e com a carga aplicada distribuída (referente à força exercida para empurrar/puxar duas minas Murena ao longo do tubo de lançamento de armas). A deflexão máxima obtida foi de  $1,263 \times 10^{-4} m$  o que constitui um valor maior do que o calculado analiticamente  $1,022 \times 10^{-4} m$  utilizando as mesmas expressões anteriores. Esta diferença era expectável *à priori* pelo facto de o cálculo analítico não ter em consideração os furos para o encaixe do funil e com os furos a área onde é aplicada a carga é menor.

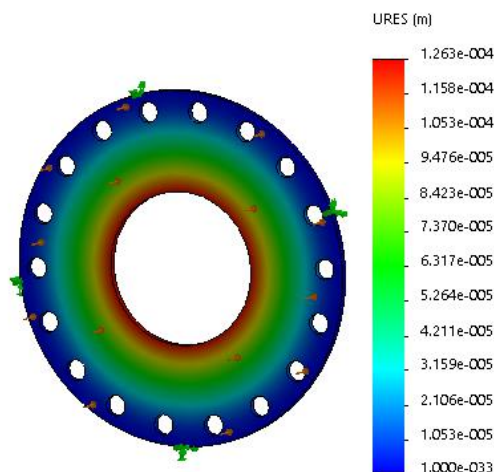


Figura 53 Simulação da carga máxima aplicada ao prato

No que diz respeito à peça principal completa foi efetuada ainda uma simulação em SolidWorks, com uma malha de 9153 elementos, em que se assume a distribuição da carga máxima (referente à força exercida para empurrar/puxar duas minas Murena ao longo do tubo de lançamento de armas) no prato (figura 54). O sistema foi considerado fixo nas duas peças de encaixe ao *weapons transport device*. O resultado obtido de  $7,432 \times 10^{-5} m$  foi bastante menor do que no estudo anterior devido ao reforço do perfil cilíndrico com dois metros de comprimento, tal como seria de esperar.

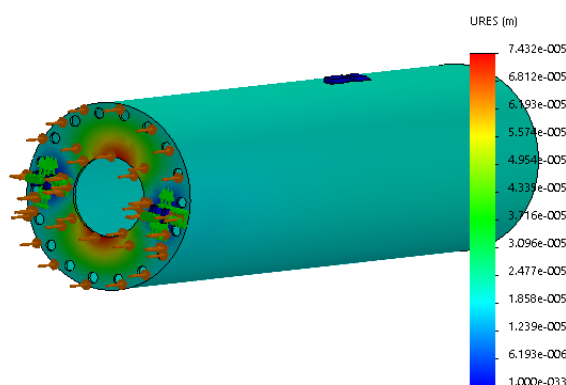


Figura 54-Simulação da carga máxima aplicada à peça completa

Deste modo conclui-se que com a espessura escolhida de 0,01 m, as deformações esperadas na peça devido à atuação do *weapons transport device* são irrelevantes e a peça principal não sofrerá deformações permanentes.

Por fim foi efetuada uma simulação considerando a peça simplesmente apoiada

em ambas as extremidades e com uma força distribuída aplicada de 800 N (equivalente ao peso de uma pessoa de 80 kg sentada a meio da superfície da peça), na superfície cilíndrica como mostra a figura 55. Desta simulação conclui-se que a tensão de *Von Mises* máxima verificada tem uma ordem de grandeza cinco vezes menor à tensão de *Yield* do material, não havendo risco de cedência.

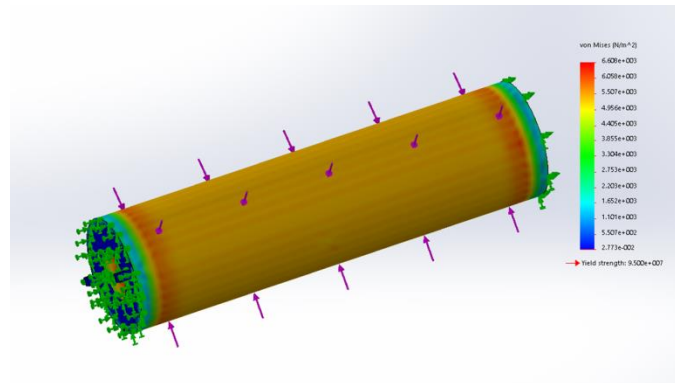


Figura 55 Simulação de uma força aplicada na superfície da peça

Este dimensionamento foi efetuado para o primeiro sistema de L/R proposto no capítulo 5. Para o sistema compatível com os tubos de lançamento de armas dos submarinos da classe *TRIDENTE*, propõe-se que a peça principal mantenha as mesmas dimensões mas sem os furos igualmente espaçados. Deste modo, os furos igualmente espaçados passam a estar na peça secundária que contém o funil. Esta peça é um perfil cilíndrico, no mesmo material alumínio 7075, com uma espessura de 6 mm no perfil cilíndrico (para suportar no mínimo a mesma carga que a peça principal conforme calculado anteriormente). A peça que contém o funil tem um furo no centro do prato onde estão também os furos igualmente espaçados com diâmetro compatível para ligar atuador. O atuador deverá efetuar um deslocamento mínimo de 60 cm para abrir o funil completamente e deixar espaço para que o AUV corrija a sua posição de entrada no sistema de L/R. O peso total do sistema é estimado no SolidWorks em 54 kg, respeitando o Cs10 apresentado no capítulo 4.



## 7. Conclusões

### 7.1. Conclusões gerais

A presente dissertação, tendo como objetivo desenvolver um sistema de lançamento e recolha de AUVs a partir dos submarinos da classe *TRIDENTE*, necessitou de várias etapas.

Inicialmente foi estudada a história e o desenvolvimento dos AUVs, cujos torpedos são considerados os primeiros veículos autónomos submersíveis. Esta constatação surgiu como ponto de partida para o projeto de um sistema lançamento como a recolha a partir dos tubos de lançamento de armas. Foram também estudadas como motivação para esta dissertação, a importância e as missões desempenhadas pelos AUVs e, em concreto, pelos AUVs SEACon que a Marinha Portuguesa possui e que têm a capacidade de realizar missões de contra medida de minas, busca e salvamento e pesquisas oceanográficas.

Tendo em consideração as metodologias de investigação adotadas como o processo de engenharia de sistemas, a teoria axiomática de projeto e o método de desenvolvimento de sistemas em “V”, estas foram descritas e aplicadas ao longo de todo o estudo. No método de desenvolvimento de sistemas em “V”, apenas a primeira parte foi aplicada sendo que não foram efetuados testes aos vários subsistemas, à sua integração e ao sistema completo. A descrição da AP e a aplicação do primeiro axioma aos sistemas de lançamento e recolha de AUVs já existentes, permitiu encontrar vários sistemas desacopláveis e um sistema com acoplamentos. A aplicação do primeiro axioma permitiu ainda concluir que existem requisitos funcionais dos níveis de decomposição mais elevados que são transversais a todos os sistemas. Na fase de lançamento estes requisitos são o da inundação e pressurização dos tubos de lançamento de armas, a interrupção do contacto entre o AUV e plataforma de lançamento e a ativação da propulsão do veículo. Já na fase da recolha do veículo, são comuns também a preparação do compartimento, a preparação do sistema de L/R e dos subsistemas que o constituem, o encaminhamento do veículo para o sistema de L/R, a existência de um algoritmo de aproximação e a imobilização do veículo.

Da avaliação dos vários sistemas já existentes foi possível concluir que as dependências referidas à teoria AP podem ser sequenciais, ou seja, um requisito só pode ser satisfeito se o(s) anterior(es) tiverem sido já satisfeitos com sucesso. Esta conclusão manteve-se também no sistema proposto para os submarinos da classe *TRIDENTE*.

Foram apresentados dois sistemas que para além de respeitar os constrangimentos impostos, respeitam também o primeiro axioma da AP, mantendo a independência entre todos os requisitos funcionais e parâmetros de projeto no que diz respeito às interações mecânicas dos PPs. O sistema apresentado nesta dissertação permite evitar o empenho de mergulhadores para lançar e recolher os AUVs a partir dos submarinos passando os militares do DMS3 a ter um papel de redundância a este sistema e tornando assim as missões menos demoradas e mais seguras. Assim, o sistema proposto nesta dissertação permite também aumentar o espectro de missões dos submarinos acrescentando as contra medidas de minas.

O sistema proposto consiste em quatro componentes diferentes: uma peça principal, uma peça secundária com o mesmo formato da principal, uma garra mecânica e um funil. A peça principal, cujo material é alumínio anodizado, tem dimensões que encaixam perfeitamente no tubo de lançamento de armas e contém um encaixe compatível com o sistema de movimento das minas Murena que são lançadas pelos submarinos da classe *TRIDENTE*. A peça principal, com um formato semelhante às minas, está projetada para em caso de alguma situação de emergência no submarino ser lançada para o exterior afundando sem denunciar a posição do submarino desnecessariamente e tem ainda um encaixe compatível com um sistema já existente de travamento do armamento para que, em caso de trânsito do submarino, o sistema não se movimente indesejavelmente no interior do tubo de lançamento de armas. No interior desta peça está uma segunda peça cilíndrica que contém um funil composto por tubos de polietileno ligados a um aro de aço-mola, com diâmetro superior ao tubo de lançamento de armas, cujas funções são evitar o contacto entre o AUV e o submarino durante o afastamento do veículo ao submarino (no lançamento) e durante a aproximação do veículo ao submarino (na recolha) e diminuir o impacto do erro do sistema de navegação do AUV na estrada para o sistema de L/R. A peça que contém o funil é acionada através de um atuador, por sua vez acionado por um motor elétrico para que o

funil abra à medida que é empurrado para o exterior do submarino e se fecha à medida que é puxado. Devido ao facto do aro exterior do funil ter um diâmetro superior ao tubo de lançamento de armas, quando no seu interior está em tensão constante e deformado, atingindo a sua forma circular apenas quando deixa de estar em contacto com a peça principal (quando é empurrado através do atuador). A garra mecânica tem o objetivo de imobilizar o veículo no interior da peça principal. Para guiar a aproximação do veículo ao sistema de L/R propôs-se um sistema composto por luzes instaladas no funil em que o AUV contém um algoritmo pré-definido para se aproximar e corrigir a sua posição de entrada no sistema através da leitura das luzes com um sensor ótico, de modo a evitar comunicações acústicas no exterior do submarino que possam comprometer a discrição do submarino.

Os constrangimentos impostos pela ESS condicionaram o projeto de modo a manter a capacidade operacional máxima de cada submarino para cumprir os requisitos da NATO, União Europeia e do Ministério da Defesa Nacional dado a Marinha Portuguesa ter ao efetivo apenas dois submarinos. Desde modo, mantém-se a capacidade de armamento total dos submarinos e não se inviabiliza nenhum dos tubos de armamento, que pudesse ficar adstrito ao lançamento e recolha de AUVs.

Para avaliar o conceito proposto, o qual não tem precedente na Marinha Portuguesa e é diferente de todos os sistemas já existentes estudados no capítulo 2, foram construídos dois protótipos que demonstram a abertura e fecho do funil provocados pelo movimento da peça principal, ficando o aro de maior diâmetro funil em tensão constante no interior da peça. A diferença nos dois protótipos é o material constituinte do funil sendo que no primeiro protótipo era constituído por varetas de carbono inseridas num prato com um ângulo de inclinação e o segundo por tubos de polietileno. No primeiro protótipo a peça ativa são as varetas devido ao ângulo de inclinação enquanto que no segundo protótipo a peça ativa é o aro de maior diâmetro do funil composto por aço mola. Em ambas os estudos experimentais, o funil abriu e fechou com sucesso, tendo-se concluído, porém, que no primeiro protótipo o funil abria somente quando o prato se encontrava na extremidade do tubo. Isto infere que o funil teria que ser recolhido ao mesmo tempo da entrada do AUV no tubo provocando acoplamentos no projeto. No estudo com o segundo protótipo tal não acontece pois o

funil abre assim que o aro de maior diâmetro deixa de estar em contacto com a peça principal e assim, a distância do prato à extremidade do tubo depende somente do comprimento dos tubos de polietileno. De referir ainda que foi realizado um ensaio de tração em ambos os casos e o valor medido aquando do fecho do funil foi inferior em mais de metade no segundo protótipo.

Foi ainda efetuado um estudo de escolha de materiais e tratamento de superfície mais adequados para as condições operacionais de funcionamento do sistema que teve como resultado o alumínio 7075 T0 anodizado. O dimensionamento das peças principal e secundária foi estudado com recurso a expressões matemáticas da aplicação de cargas em pratos (nas mesmas condições de aplicação de carga à extremidade da peça desenhada) e a simulações computacionais usando o método dos elementos finitos no programa SolidWorks. Utilizando este mesmo programa foram apresentados os desenhos técnicos das peças e do sistema que as integra.

## **7.2. Trabalhos Futuros**

Desenvolver este projeto da fase conceptual de decomposição ao segundo nível até ao detalhe necessário à construção de um modelo. Em particular falta definir o tipo de atuação da peça secundária e a eventual necessidade de guias, construir o modelo à escala 1:1 e efetuar testes nos submarinos da classe *TRIDENTE*. Através do dimensionamento proposto nesta dissertação é possível construir o modelo à escala e testar, numa primeira fase, o movimento do sistema no tubo de lançamento de armas. Através da instalação de sensores de leitura ótica nos AUVs poderão ser efetuados testes da aproximação do veículo ao sistema e com os testes de acústica submarina para a escolha do melhor atuador a aplicar no sistema, poderá ser testado o sistema e a integração dos vários subsistemas por completo no submarino em imersão. Em caso de sucesso completa-se assim o modelo de validação e verificação aplicado na presente dissertação.

Desenvolver um sistema de lançamento e recolha dos AUVs a partir de navios de superfície. Os navios hidrográficos, por exemplo, possuem uma elevada capacidade de carga e armazenamento pelo que podem constituir plataformas de apoio importantes a algumas missões dos AUV SEACon no âmbito da hidrografia, oceanografia e

mapeamento de fundos oceânicos.

Elaborar um conceito de operação conjunto dos AUVs SEAcon e GAVIA. Submeter a publicação por parte do Comando Naval um documento que contenha os conceitos de operação das duas classes de AUVs operadas atualmente pela Marinha Portuguesa. O lançamento e recolha dos AUVs SEAcon deverão constar neste documento com as várias funções que satisfazem os requisitos a ser atribuídas segundo o detalhe do navio.

Por fim fica a intenção de continuar envolvido no projeto SEACon e de continuar a colaborar com o CINAV para não perder as capacidades de investigação exploradas durante o ano letivo 2016/2017 que culmina com a apresentação da presente dissertação.

### **7.3. Lições Aprendidas**

A elaboração da presente dissertação permitiu aplicar conhecimentos de praticamente todas as unidades curriculares do ciclo de estudos de Engenharia Naval-Ramo de Mecânica, o que permitiu cimentar e relembrar conteúdos aprendidos durante os cinco anos de curso. Este trabalho obrigou a equacionar um problema real derivado de uma necessidade de uma instituição e procurar desenvolver soluções científicas e tecnicamente fundamentadas. Em particular, o sistema desenvolvido não tinha precedentes na Marinha Portuguesa, nem em outras marinhas, permitindo liberdade criativa e a compilação de bastantes estudos já realizados na área para fundamentar a proposta apresentada. Do mesmo modo, a presente dissertação permitiu adquirir conhecimentos sobre a engenharia de sistemas que preconiza um modelo fundamental de sintetização do pensamento na fase anteprojecto (sistematização concetual do sistema) e ainda aprender a teoria axiomática de projeto que constitui um modo de encarar o projeto e de o validar à partida como um bom projeto através dos axiomas da independência e da informação. O axioma da independência passou a estar presente no *mindset* do autor para muitas outras situações na medida em que passou a procurar e sistematizar sempre soluções independentes para os problemas que surgem.



## **Bibliografia.**

- AMERICAN PSYCHOLOGICAL ASSOCIATION (2010), "Publication Manual of the American Psychological Association 6th edition", Washington, DC.
- AVALLONE, Eugene A., BAUMEISTER, Theodore, SADEGH, Ali M. (2007), Standard Handbook for Mechanical Engineers 11th edition, Nova Iorque, EUA, Mc Graw Hill.
- BENABDALLAH, Habib S. (2007), "*Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions*" Tribology International journal, janeiro, vol. 40 pp. 64 - 73.
- BLIDBERG, D.R, (2001) "*The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A Brief Summary*", Autonomous Undersea Systems Institute publications, ICRA Conference Maio de 2001, Seoul, Coreia.
- BRAGA, José Miguel Almeida, (2010), "Control of underwater vehicles on autonomous docking maneuvers", dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BRAGA, J., SOUSA, J., HEALEY, A. J. (2012), "Navigation Scheme for the LSTS SEACON Vehicles: Theory and Application", IFAC Proceedings Volumes, vol. 45 pp. 69- 73.
- CALVERT, Willard et al. (2011), "A System to integrate Unmanned Undersea Vehicles with a submarine host platform", Naval Postgraduate school, Monterrey, CA, EUA.
- CEBON, D. et al (2010) "*CES EduPack 2010 User's Manual*", Release 5, Granta Design Limited, Cambridge, Reino Unido.
- Chefe do Estado Maior da Armada (2017), "Diretiva de Planeamento da Marinha", Marinha Portuguesa.
- CLOUGH, B. T. (2002), "*Metrics, schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's.*" Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS) conference, 13 a 15 de Agosto, Gaithersburg, MD, EUA.
- COELHO, A.M. Gonçalves (2004), "Axiomatic Design and the current engineering paradigm", apresentado na Computing and Solutions in Manufacturing Engineering de 16 a 18 de setembro, Brasov, Roménia.
- COWEN, Steve, BRIEST, Susan, DOMBROWSKI, James, (1997) "*Underwater docking of autonomous undersea vehicles using optical terminal guidance*", apresentado em OCEANS 1997. MTS/IEEE Conference 6 a 9 de Outubro 1997, Halifax, Canadá.
- CUNHA, Luís Veiga da (2004), "Desenho Técnico", Lisboa, Fundação Caloust Gulbenkian.
- CURIE, Jason et al. (2014), "*Dynamics of two active autonomous dock mechanisms for*

*AUV recover*”, Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 38, Nº 2, pp 213-226.

DIAS, Teixeira F. et al (2010), “Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia”, Lidel editora, Lisboa.

Decreto de lei 330/93, de 25 de Setembro.

FEDOR, R. (2009), “Simulation of a Launch and Recovery of an UUV to a Submarine”, dissertação para obtenção do grau de mestre em Arquitetura Naval na Royal Institute of Technology.

FEEZOR, M. D. et al (1997), “*Autonomous underwater vehicle homing docking via electromagnetic guidance*”, apresentado em OCEANS 1997.MTS/IEEE Conference 6 a 9 de Outubro 1997, Halifax, Canadá.

GISH, Lynn Andrew, (2004), “Design of na AUV Recharging System”, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Ocean Systems Management no Massachusetts Institute of Technology.

GRANGE, David L. (2000), “Asymmetric Warfare: old method, new concern”, apresentado no National Strategy Forum Review, Chicago, EUA.

GWIN, Robert, SMITH, Jeffrey (1992), “*A distributed launch and recovery system for an AUV and a manned submersible*”, apresentado no Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, 2 a 3 de Junho de 1992, Washington DC, EUA.

HARDY, Tim, BARLOW, Gavin, (2008), “*Unmanned Underwater Vehicle (UUV) deployment and retrieval considerations for submarines*” ,INEC, Hamburgo, Alemanha.

Instituto Hidrográfico (1981), “Manual de Navegação”, junho, Lisboa.

INZARTSEV, Alexander T. (2009), “*Underwater Vehicles*”, Rijeka, Croácia, In-Tech.

KAR, P., BAILEY, M. (1996), “*Characteristics of Good Requirement*” apresentado no International INCOSE Symposium, Proceedings INPE, vol. 2, pp 284-291.

KAWASAKI, T. et al. (2003), “*Development of AUV “Marine Bird” with inderwater Docking and Recharging System*”, apresentado no The 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 25 a 27 de Junho, Tóquio, Japão.

MAURELLI, Francesco (2009), “Investigation of portability of space docking techniques for autonomous underwater docking” apresentado na conferência OCEANS 2009, 11 a 14 maio, Bremen, Alemanha.

MCGILLIVARY, P. et al (2012), “*Integrating Autonomous Underwater Vessels, Surface Vessels and Aircraft as Persistent Surveillance Components of Ocean Observing Studies*”, apresentado na conferência *Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, Proceedings IEEE/OES, 24 a 27 de Setembro, Southampton, Reino Unido.

- NAM-PYO, Suh, (1990), “The Principles of Design”, Nova Iorque, Oxford University Press.
- (1998), “Axiomatic Design theory for systems”, *Research in Engineering Design*, vol. 10, issue 4, Dezembro, Londres, pp. 189 - 209.
- (2001), “Axiomatic Design: Advances and Applications”, Nova Iorque, Oxford University Press.
- NATO, (2007), “APP-7(D) Joint Brevity Words Publications”, NATO Standardization Agency, Bruxelas, Bélgica.
- NATO (2003), “Rules of Engagement, MC 362/1”, 23 July, Bruxelas, Bélgica.
- NIÑO, César Hernando Valencia, DUTRA, Max Suell (2010), “Estado del Arte de los Vehículos Autónomos Sumergibles Alimentados por Energía Solar”, publicado em ITECKNE vol. 7 nº1 julho, Bucaramanga, Colômbia, pp. 46 - 53.
- Norma Internacional standard IEEE std. 1220-2005 (2005), “*Systems engineering- Application and management of the systems engineering process*”, IEEE Computer Society, Nova Iorque, EUA.
- Norma Portuguesa NP-EN 13306 (2007), “Terminologia da manutenção”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- Norma Militar MIL-STD-499B (1993), “Systems Engineering”, Department of Defense, Washington DC, EUA.
- PARTAN, Jim, KUROSE, Jim, LEVINE Brian Neil (2007), “A survey of practical issues in underwater networks, publicado no *Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 11 nº4, pp. 23-33.
- PARK, Gyung-Jin (2007) “Analytic Methods for Design Practice”, Londres, Reino Unido, Springer.
- PARK, Jin-Yeong, et al (2009), “*Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera*”, *IEEE Journal of Ocean Engineering*, vol. 36 pp. 48 – 61.
- PODDER, Tarun, SIBENNEM, Mark, BELLINGHAM, James (2004), “AUV Docking System for Sustainable Science Missions” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Abril, Nova Orleans, EUA.
- RENILSON, Martin, (2014), “A simplified concept for recovering a UUV to a submarine”, publicado em *Underwater Technology* jornal, Vol. 32, Nº. 3, pp. 193–197.
- RUMBAUGH, James, JACOBSON, Ivar, BOOCH, Grady (2004), “*The Unified Modeling Language Reference Manual 2nd edition*”, Addison-Wesley, Boston, EUA.
- SANTOS, Miguel Cavique (2010), “Uma abordagem axiomática ao projecto de sistemas de climatização”, dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia

Mecânica pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

SARGENT, Robert, G. (1988), “*A tutorial on validation and verification of simulation models*”, Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference, San Diego, Califórnia, EUA, pp. 33-39.

SERWAY, Raymond A., JEWETT, John W. (2010), “Physics for scientists and engineers with modern physics 8th edition, Belmont, California, EUA, Brooks/Cole.

SINGH, H. et al. (2001), “*Docking for an Autonomous Ocean Sampling Network*”, IEEE journal of oceanic engineering, VOL. 26, N° 4, Outubro, pp 498 - 514.

SOTIROPOULOS, P., et al. (2009), “AUV docking system for existing underwater control panel”, apresentado em OCEANS 2009-EUROPE, 11 a 14 Maio, Piscataway, NJ, EUA.

SOUSA, João Tasso, PEREIRA, Fernando Lobo (2002), “Coordinated control strategies for networked vehicles: an application to autonomous underwater vehicles”, Proceedings of the Fifteenth International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems, South Bend, Indiana, EUA.

STOKEY, Roger, et al. (2001), “*Enabling Technologies for REMUS Docking: An Integral Component of an Autonomous Ocean-Sampling Network*”, IEEE journal of oceanic engineering, VOL. 26, N° 4, Outubro, pp 487 - 497.

U.S. Navy, (2004), “The Navy Unmanned Undersea Vehicles (UUV) Master Plan”, Washington DC, Julho.

VANDERBERG, Troy, D. (2010), “*Manning and maintainability of a submarine Unmanned Undersea Vehicle (UUV) program a systems engineering case study*”, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Sistemas no Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, EUA.

WATT, George D. et al (2016), “A Concept for Docking a UUV With a Slowly Moving Submarine Under Waves”, Ocean Engineering, IEEE Journal of Ocean Engineering, vol. 41 pp. 471 – 498.

WATT, G. D. et al(2011), “*Towards an automated active UUV dock on a slowly moving submarine*” apresentado em The RINA Warship 2011: Naval Submarines and UUVs, Bath, June.

WIRTZ, Marius, HILDEBRANDT, Marc, GAUDING, Christopher, (2012), “*Design and Test of a Robust Docking System for Hovering AUVs*”, apresentado na Oceans Conference, 14-19 Outubro, Hampton Roads, VA, EUA.

YOUNG, Warren C., BUDYNAS, Richard G. (2002) “Roark’s Formulas for Stress and Strain 7th edition”, McGrawhill, New York, EUA.

<http://www.awg.army.mil/> (última consulta a 26 de Março 2017)

[www.3hconsulting.com](http://www.3hconsulting.com) (última consulta a 22 de Outubro de 2016)

[www.auvac.org](http://www.auvac.org) (última consulta a 29 de Dezembro de 2016)

[www.thinkdefence.co.uk](http://www.thinkdefence.co.uk) (última consulta a 06 de Janeiro de 2017)

[www.seaeye.com](http://www.seaeye.com) (última consulta a 25 de Março de 2017)

[www.whoi.edu/oceanus/feature/communicating-under-sea-ice](http://www.whoi.edu/oceanus/feature/communicating-under-sea-ice) (última consulta a 29 de Maio de 2017)

[www.LSTS.fe.up.pt](http://www.LSTS.fe.up.pt) (última consulta a 20 de Junho de 2017)

[www.ieee.org](http://www.ieee.org) (última consulta a 08 de Junho de 2017)



## Anexo A – Ficha técnica material obtido no estudo de materiais

Material escolhido pelo CES Edupack - Alumínio (7075-O).



Aluminum, 7075, wrought, T0

Page 1 of 4

### General properties

#### Designation

7075

#### UNS number

A97075

#### Density

2.77e3 - 2.83e3 kg/m<sup>3</sup>

#### Price

\* 1.27 - 1.4 EUR/kg

#### Tradenames

AZ 84, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY); AZ 83, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY); PERUNAL, Aluminium Walzwerke Singen GmbH (GERMANY); PERUNAL 215, Aluminium Walzwerke Singen GmbH (GERMANY); AZ 79, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY); AZ 82, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY); AZ 83, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY); AZ 67, Otto Fuchs Metallwerke (GERMANY);

### Composition overview

#### Composition (summary)

Al/5.6Zn/2.5Mg/1.6CuCr

#### Base

Al (Aluminum)

### Composition detail

Al (aluminum)	90	%
Cr (chromium)	0	%
Cu (copper)	1.6	%
Mg (magnesium)	2.5	%
Zn (zinc)	5.6	%

### Bio-data

#### RoHS (EU) compliant grades?

✓

#### Toxicity rating

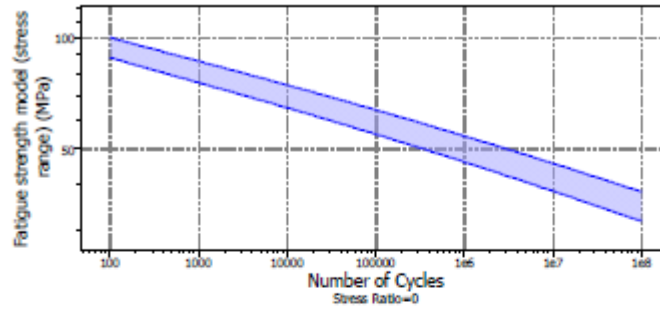
Non-toxic

### Mechanical properties

Young's modulus	72	- 76	GPa
Flexural modulus	* 72	- 76	GPa
Shear modulus	28	- 28	GPa
Bulk modulus	67	- 74	GPa
Poisson's ratio	0.325	- 0.335	
Shape factor	40		
Yield strength (elastic limit)	100	- 110	MPa
Tensile strength	214	- 236	MPa
Compressive strength	100	- 110	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	100	- 110	MPa
Elongation	13.9	- 16.1	% strain
Hardness - Vickers	* 31.4	- 34.7	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 50.2	- 53	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 38.4	- 45.7	MPa

Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7





Fracture toughness	* 35	- 39	MPa.m <sup>0.5</sup>
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-4	- 0.002	

**Thermal properties**

Melting point	475	- 636	°C
Maximum service temperature	110	- 170	°C
Minimum service temperature	-273		°C
Thermal conductivity	131	- 137	W/m.°C
Specific heat capacity	941	- 979	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	22.9	- 24.1	µstrain/°C
Latent heat of fusion	384	- 393	kJ/kg

**Electrical properties**

Electrical resistivity	5	- 5.2	µohm.cm
------------------------	---	-------	---------

**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Durability: flammability**

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

**Durability: fluids and sunlight**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Acceptable
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Oxidation at 500C	Unacceptable

**Geo-economic data for principal component**

Principal component	Aluminum		
Typical exploited ore grade	30.4	- 33.6	%
Minimum economic ore grade	25	- 39	%
Abundance in Earth's crust	7.79e4	- 8.61e4	ppm
Abundance in seawater	2.53e-4	- 2.8e-4	ppm
Annual world production	3.14e7	- 3.48e7	tonne/yr
Reserves			

No warranty is given for the accuracy of this data. Values marked \* are estimates.  
CES Edupack 2010 (C) Grant Design Ltd

	1.99e10	-	2.2e10	tonne
<b>Primary material production: energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	197	-	218	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	11.4	-	12.6	kg/kg
NOx creation	* 74.8	-	82.7	g/kg
SOx creation	* 128	-	141	g/kg
Water usage	495	-	1.49e3	l/kg
<b>Eco-indicators for principal component</b>				
Eco-indicator 95	780			millipoints/kg
Eco-indicator 99	710			millipoints/kg
<b>Material processing: energy</b>				
Casting energy	* 2.24	-	2.47	MJ/kg
Forging, rolling energy	* 2.42	-	2.67	MJ/kg
Metal powder forming energy	* 20.9	-	23.1	MJ/kg
Vaporization energy	* 18.1	-	17.8	MJ/kg
Conventional machining energy (per unit wt removed)	* 6.08	-	6.72	MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 30.1	-	33.3	MJ/kg
<b>Material processing: CO2 footprint</b>				
Casting CO2	* 0.134	-	0.148	kg/kg
Forging, rolling CO2	* 0.194	-	0.214	kg/kg
Metal powder forming CO2	* 1.67	-	1.85	kg/kg
Vaporization CO2	* 1.29	-	1.42	kg/kg
Conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.498	-	0.538	kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 2.41	-	2.66	kg/kg
<b>Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction</b>				
Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	17.1	-	20.3	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	0.958	-	1.21	kg/kg
Recycle fraction in current supply	40.5	-	44.7	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			
<b>Possible substitutes for principal component</b>				
Copper can replace aluminum in electrical applications; magnesium, titanium, and steel can substitute for aluminum in structural and ground transportation uses. Composites, wood, and steel can substitute for aluminum in construction. Glass, plastics, paper, and steel can substitute for aluminum in packaging.				

**Notes**

**Other notes**

Prices of Aluminum alloys fluctuate greatly and are dependent on batch size, unit size, forming methods, etc.

**Reference sources**

Data compiled from multiple sources. See links to the References table.

**Standards with similar compositions**

The following information is taken from ASM AlloyFinder 3 - see link to References table for further information.

CSA HA.4 0.7075 (ON Canada)  
 CSA HA.4 7075Alclad (ON Canada)  
 CSA HA.5 0.7075 (ON Canada)  
 CSA HA.7 0.7075 (ON Canada)  
 CSA HA.8 0.7075 (ON Canada)  
 ISO: Al-Zn5.5MgCu  
 UK (BS Pre-1980): n/a  
 USA (UNS): A97075  
 Germany (W.-Nr): 3.4365  
 Germany (DIN): AlZnMgCu1.5  
 France: A-Z5GU  
 Italy (UNI): 9007/2

**Links**

[ProcessUniverse](#)

[Producers](#)

[Reference](#)

[Shape](#)

## Apêndice A – Lista de cálculos efetuados em MathCad.

Para os seguintes cálculos considera-se:  $r_i$  é o raio interno do prato ( $m$ );  $r_e$  é o raio externo do prato ( $m$ );  $\sigma$  é o limite de elasticidade característico do material ( $MPa$ );  $E$  é o módulo de young característico do material ( $GPa$ );  $\nu$  é o coeficiente de Poisson característico do material;  $C_s$  é o coeficiente de segurança aplicado;  $M$  é o momento fletor ( $N.m$ );  $t$  é a espessura do prato ( $m$ );  $q$  é a força aplicada por unidade de área ( $N/m^2$ );  $Q$  é a força de corte ou força exercida no perímetro da circunferência ( $N/m$ );  $y$  é a deflexão do prato ( $m$ ). As restantes equações utilizadas são aplicadas ao caso descrito no capítulo 6 de aplicação de uma carga a um prato com o diâmetro exterior livre e o diâmetro interior livre.

$$r_i = 0,115 \text{ m}$$

$$r_e = 0,2665 \text{ m}$$

$$\sigma = 100 \text{ MPa}$$

$$E = 72 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,33$$

Aplicando o coeficiente de segurança de 4 como mencionado no corpo da dissertação:

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{C_s} = \frac{100 \times 10^6}{4} = 2,7 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$L_{17} = \frac{1}{4} \times \left[ 1 - \frac{1-\nu}{4} \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^4 \right] - \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \times [1 + (1+\nu) \times \ln \left( \frac{r_e}{r_i} \right)] \right]$$

$$C_7 = \frac{1}{2} \times (1 - \nu^2) \times \left( \frac{r_i}{r_e} - \frac{r_e}{r_i} \right)$$

$$C_4 = \frac{1}{2} \times \left[ (1 + \nu) \times \frac{b}{r_e} + (1 - \nu) \times \frac{r_e}{b} \right]$$

$$L_{14} = \frac{1}{16} \times \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^4 - 4 \times \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \times \ln \left( \frac{r_e}{r_i} \right) \right]$$

$$C_1 = \frac{1 + \nu}{2} \times \frac{b}{r_e} \times \ln \left( \frac{r_e}{b} \right) + \frac{1 - \nu}{4} \times \left( \frac{r_e}{b} - \frac{b}{r_e} \right)$$

$$L_{11} = \frac{1}{64} \left[ 1 + 4 \times \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 - 5 \times \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^4 - 4 \times \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \times \left( 2 + \left( \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \right) \times \ln \left( \frac{r_e}{r_i} \right) \right]$$

$$M = -q \times r_e^2 \left( L_{17} - \frac{C_7}{C_4} \times L_{14} \right)$$

$$t = \sqrt{\frac{6 \times (-M)}{\sigma_s}}$$

$$Q = \frac{-q}{2 \times r_e} \times (r_e^2 - r_i^2)$$

Para efeitos de procurar validar o modelo utilizado no *software* Solidworks, calculou-se as espessuras mínimas para seis valores de cargas aplicadas diferentes e calculou-se também a deflexão esperada num prato de espessura fixa para essas mesmas seis cargas.

$q_i :=$			
1000	$Q =$	-108.438	$M =$
2000		-216.875	-6.692
3000		-325.313	-13.385
4000		-433.75	-20.077
5000		-542.188	-26.77
60000		$-6.506 \times 10^3$	-33.462
			-401.543
			$t =$
			$1.267 \times 10^{-3}$
			$1.792 \times 10^{-3}$
			$2.195 \times 10^{-3}$
			$2.535 \times 10^{-3}$
			$2.834 \times 10^{-3}$
			$9.817 \times 10^{-3}$

Considerando agora t um valor fixo de 0,01m:

$$D = \frac{E \times t^3}{12 \times (1 - \nu^2)}$$

$$y = \frac{q \times r_e}{D} \times \left( \frac{C_1 \times L_{14}}{C_4} - L_{11} \right)$$

$$y = \begin{pmatrix} 5.949 \times 10^{-6} \\ 1.19 \times 10^{-5} \\ 1.785 \times 10^{-5} \\ 2.379 \times 10^{-5} \\ 2.974 \times 10^{-5} \\ 3.569 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Para se calcular a espessura mínima considerou-se a carga aplicada equivalente ao peso de duas minas Murena ( $2 \times 7800$ ) e um coeficiente de atrito de 0,2 entre o alumínio utilizado e o polímero que constitui o interior do tubo de lançamento de armas.

$$q = \frac{2 \times 7800}{\pi \times r_e^2 - \pi \times r_i^2} \times 0,2 = 1,718 \times 10^4 N/m^2$$

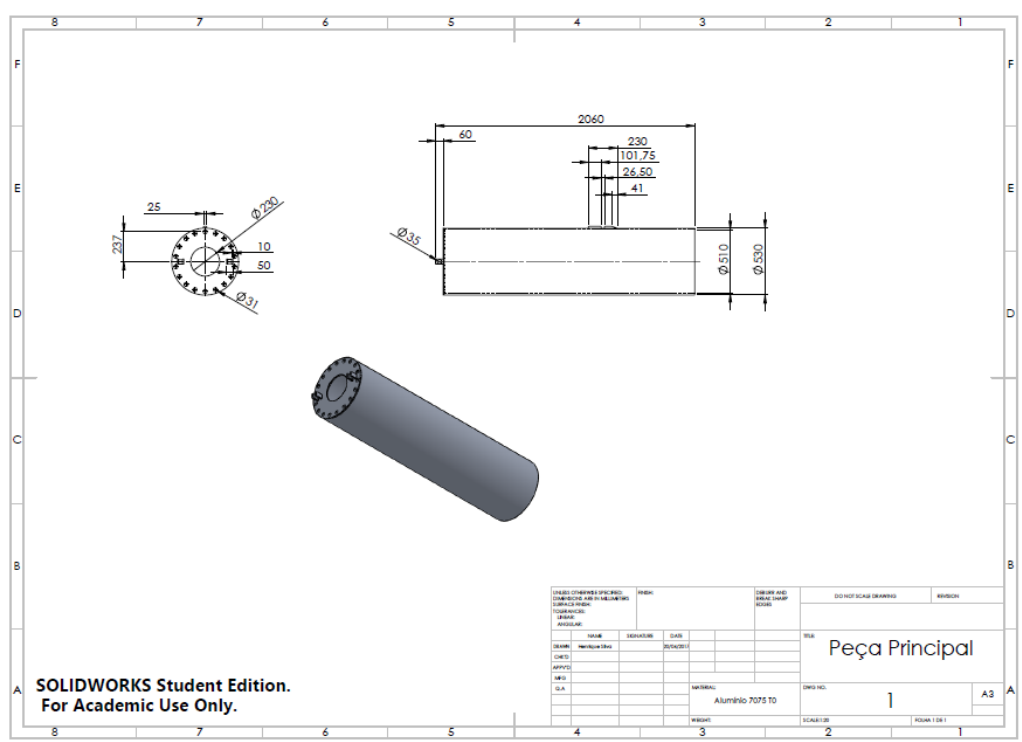
Utilizando as expressões apresentadas no caso anterior:

$$t = 5,253 \times 10^{-3} m \text{ e que teria uma deflexão máxima } y = 7,05 \times 10^{-4} m$$

Considerando a espessura escolhida de 0,01 m, a deflexão máxima calculada segundo as expressões acima foi de  $y = 1,022 \times 10^{-4} m$



## Apêndice B – Desenhos técnicos do projeto proposto.



Desenhos da segunda proposta (compatível com os submarinos):

