



ESCOLA NAVAL

ta sainte & bi-faire



Francisco Daniel Cordeiro Gaio

Tradição e Inovação na Navegação à Vela no N.E. “Sagres”

*Estudo de implementação de aparelhos de força mecânicos
para auxílio da manobra e navegação à vela*

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

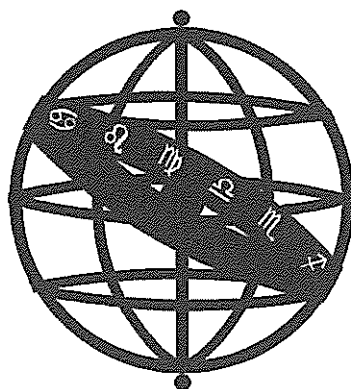


Alfeite
2022



ESCOLA NAVAL

Infante D. Henrique



Francisco Daniel Cordeiro Gaio

Tradição e Inovação na Navegação à Vela no N.E.

"Sagres"

*Estudo de implementação de aparelhos de força mecânicos
para auxílio da manobra e navegação à vela*

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

Orientação de: Francisco de Figueiredo e Silva Cunha Salvado

O Aluno Mestrando,

O Orientador,



Francisco Gaio



Francisco Salvado

Alfeite
2022

"A Ciência explica *o que é*,
Engenharia cria *o que nunca foi*,
Matemática não é nem ciência nem engenharia,
Física e química são ciência mas não engenharia."

Tradução livre de SHIGLEY, J.E., "Mechanical Engineering Design", 7^aed, Ed.
McGraw-Hill, ISBN 0-07-292193-5, pp 6

Aos que a *Pátria* honram,

Agradecimentos

Um agradecimento a todos os intervenientes, diretos e indiretos, docentes e não docentes, militares e civis, colegas e camaradas, na minha formação académica e que desde muito cedo me desenvolveram o interesse para a matemática, o raciocínio, a lógica, e mais presentemente para a Engenharia.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Sr. Almirante Cunha Salvado, que sempre acreditou neste projeto incentivando-me em todas as opções tomadas.

Neste trabalho em concreto foi fundamental o contacto com a guarnição do N.E. “Sagres”, que sempre me recebeu da melhor forma com uma total disponibilidade para me auxiliar em diferentes aspetos.

Endereço um agradecimento ao Sr. Professor Gil e à Sra. Professora Carla, que me proporcionaram a realização dos ensaios no túnel aerodinâmico, e que me receberam da melhor forma.

Resumo

Os navios à vela, como resultado de uma evolução global, têm ao longo dos tempos vindo, a ser substituídos por navios de propulsão mecânica. No entanto, os mercados correspondentes a estes dois tipos de propulsão não são totalmente concorrentes. Os navios-escola são exemplos da procura específica por este tipo de navios à vela, onde os cadetes podem ter um contacto direto com as componentes ambientais e a forma como estas afetam a manobra do navio. Contudo, por forma a tornar estes navios sustentáveis é necessário reinventar o conceito, nomeadamente em três pilares essenciais: segurança, eficiência e tecnologia. O N.E. “Sagres” da Marinha Portuguesa recorre a uma guarnição numerosa para a manobra do aparelho vélico, que enfrenta, frequentemente, condições atmosféricas adversas no desempenho das suas funções. Deste modo surge a necessidade de mecanizar, com recurso a aparelhos de força, algumas das manobras mais exigentes, criando melhores condições de segurança e eficiência. Neste sentido, é fundamental calcular os esforços associados ao aparelho vélico resultantes da própria inércia do equipamento como também da interação vento-equipamento. Para este efeito, efetuou-se um estudo que conciliou o conhecimento empírico característico da manobra destes navios, o dimensionamento efetuado na conceção do aparelho vélico, a criação de um modelo analítico que permita o cálculo matemático, a utilização de softwares com capacidade de simulação CFD e ainda um método experimental com recurso a túnel aerodinâmico num modelo físico à escala. Ou seja, pretendeu-se avaliar a combinação entre a forma mais tradicional de operação baseada essencialmente nos saberes associados à construção desta tipologia de navios, nos séculos passados, e as ferramentas atualmente disponíveis, com capacidades de análise mais rigorosas.

Palavras-chave: NE “Sagres”, Navios redondos, Aerodinâmica da vela, Popa, CFD, Túnel aerodinâmico

Abstract

Sailing ships, as consequence of the global evolution, have been replaced over time by mechanical propulsion ships. However, the markets corresponding to these two types of propulsion are not overall antagonistic. Training ships are examples of a specific demand for this type of sailing vessel, where cadets can have direct contact with environmental elements and how they affect the ship's manoeuvre. However, to make these ships sustainable, it is necessary to reinvent the concept, in three essential ways: safety, efficiency and technology. The N.E. "Sagres" is a tall ship of the Portuguese Navy using a large crew to manoeuvre it, which often faces adverse weather conditions in the performance of its duties. Thus, the need arises to mechanize some of the most demanding sail manoeuvres using powered drives, creating better conditions of safety and efficiency. In this sense, it is essential to calculate the forces associated with the running rigging resulting from the inertia of the equipment itself, as well as from the wind-equipment interaction. For this purpose, it is suggested a study that match the empirical knowledge characteristic of the manoeuvre of these ships, the dimensioning carried out in the design of the sail equipment, the creation of an analytical model that allows the mathematical calculation, the use of software with CFD simulation capability and an experimental method using a wind tunnel with a scale model. In other words, it is a combination between the more traditional approach based essentially on perceived knowledge used in the construction of this typology of ships in past centuries, and the tools currently available with more rigorous analysis capabilities.

Keywords: NE "Sagres", Square-rigged, Sail aerodynamics, Downwind sail, CFD, Wind tunnel

Índice

Introdução	1
1 Identificação da Necessidade	3
2 Definição do Problema	7
2.1 Revisão Bibliográfica	7
2.1.1 Evolução Histórica dos Meios de Propulsão	7
2.1.2 Perspetiva Futura para os Meios de Propulsão	11
2.2 N. E. “Sagres”	15
2.2.1 Nota Histórica	15
2.2.2 Embarque a Bordo do Navio	17
2.2.3 Características Principais	17
2.2.4 Aparelho Vélido	19
2.3 Enquadramento Teórico	23
2.3.1 Teoria da Navegação à Vela	23
2.3.2 Interação entre o Vento e as Velas	25
2.3.3 Camada Limite na Superfície do Mar	28
2.3.4 Simulação CFD	28
2.3.5 Túneis Aerodinâmicos	29
2.3.6 Enquadramento Legal - Nomenclatura e Classificação	33
2.4 Síntese - Anteprojeto	39
2.5 Metodologia de Investigação	41
3 Análise	45
3.1 Análise Empírica	47
3.1.1 Força Resultante do Número de Elementos Necessários por cada Manobra	47
3.1.2 Tensão de Rutura dos Cabos	50
3.2 Recurso às Sociedades Classificadoras	52
3.2.1 Tensões de Rutura dos Equipamentos	52

3.2.2	Forças Transferidas aos Cabos	53
3.3	Modelo Analítico	55
3.3.1	Forças Gravitacionais	55
3.3.2	Forças Aerodinâmicas	63
3.4	Simulação em Software	65
3.5	Método Experimental	77
3.5.1	Objetivos dos Ensaios Experimentais	77
3.5.2	Variáveis em Estudo	77
3.5.3	Construção do Modelo à Escala	78
3.5.4	Análise Dimensional	80
3.5.5	Simulação CFD Pré-Experimental	81
3.5.6	Ensaios Experimentais	81
3.5.7	Processamento dos Resultados Experimentais	82
3.6	Análise e Discussão dos Resultados	84
4	Projeto de Construção	89
4.1	Normas para o Dimensionamento dos Aparelhos de Força	89
4.2	Estudo do Mercado	92
4.2.1	Soluções Hidráulicas e Elétricas	92
4.2.2	Geometrias Possíveis	93
4.3	Instalação e Configuração dos Aparelhos de Força	94
4.4	Dimensionamento e Análise Estrutural da Instalação dos Aparelhos de Força	99
4.4.1	Ostagas do Mastro do Traquete	100
4.4.2	Braços do Mastro do Traquete	101
4.4.3	Ostagas do Mastro do Grande	102
4.4.4	Braços do Mastro do Grande	103
	Conclusão	103
	Apêndices	113
A	Navios que Possuem Mecanização do Aparelho Vélco	113
B	Documentação Técnica - Direção de Navios	119
C	Dados de Entrada Relativos ao Aparelho Vélco	121
D	Índice de Cabos da Manobra do Velame do N.E. “Sagres”	129

E	Sociedades Classificadoras	153
E.1	DNVGL-ST-0411 - Tall Ship Rigs	154
F	Manobras Correspondentes a cada Aparelho de Força	157
G	Simulação CFD	159
G.1	Modelação da Geometria das Velas em <i>Solidworks</i>	159
G.2	Coeficiente de Arrasto	162
G.3	Características do Escoamento Externo na Superfície da Vela e Distribuição de Pressões	163
H	Método Experimental	171
H.0.1	Geometria Diferentes das Velas para os Ensaios Experimentais	171
H.0.2	Calibração do Sistema de medição de forças	175
H.0.3	Registos das Forças durante os Ensaios Experimentais	177
H.0.4	Características do Escoamento	181
H.0.5	Processamento dos Resultados dos Ensaios	181
I	Aparelhos de Força - Estudo do Mercado	191
J	Instalação dos Aparelhos de Força	203
K	Análise Estrutural da Instalação dos Aparelhos de Força	223

Lista de Figuras

1.1	Diagrama da evolução do conceito da navegação à vela	4
2.1	Navios de guerra romanos com velas e remos em simultâneo	8
2.2	Os principais navios portugueses do segundo quartel do século XVI	9
2.3	SS Great Eastern (1866)	10
2.4	<i>C 320 Kite</i> um modo pioneiro nos métodos de propulsão assistidos por vento	12
2.5	Navio da marinha mercante com instalação de <i>rotor sails</i>	13
2.6	KRI Bima Suci (2017), o navio-escola da Marinha da Indonésia	14
2.7	Navio Escola Albert Leo Schlageter lançado à água	16
2.8	Plano vélico do N.E. “Sagres”	19
2.9	Modelo do escoamento de ar com a rotação da Terra	23
2.10	Mareações e limites de bolina de um navio redondo	24
2.11	Forças aerodinâmicas resultantes da interação entre vento e a vela	26
2.12	Variação dos coeficientes de arrasto e de sustentação para diferentes ângulos de ataque	27
2.13	Representação gráfica da variação da velocidade em altura (White, 2016)	28
2.14	Câmara de ensaios do túnel aerodinâmico da FCT-UNL	32
2.15	Fotografia do manómetro de Betz utilizado nas medições	33
2.16	Diagrama da localização dos aparelhos de força	39
2.17	Espiral do Projeto de Harvey Evans	42
2.18	Metodologia de investigação adotada	43
3.1	Diagrama da análise de forças	46
3.2	Posição dos elementos na manobra de bracear	48
3.3	Tensão de rutura dos cabos em <i>AstraLine</i>	51
3.4	Diagrama força resultante do vento	53
3.5	Esquema das projeções para obtenção dos ângulos entre os cabos e as vergas	60
3.6	Diagrama bidimensional da aplicação de forças na superfície da vela	64

3.7	Referencial cartesiano adotado para a simulação CFD	66
3.8	Exemplo da edição da geometria de uma vela tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical)	67
3.9	Exemplo da construção de uma malha para análise de elementos finitos numa vela tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical) . . .	67
3.10	Diferentes posições estudadas para o exemplo de uma vela bidimensional	67
3.11	Perfil da força de arrasto para diferentes posições da verga	68
3.12	Perfil do coeficiente de arrasto para diferentes posições da verga . .	69
3.13	Perfil da força de sustentação para diferentes posições da verga . . .	70
3.14	Perfil do coeficiente de sustentação para diferentes posições da verga	70
3.15	Perfil da força resultante das cargas aerodinâmicas para diferentes posições da verga	71
3.16	Localização dos centros de pressão das diferentes geometrias de velas com o aumento do ângulo de ataque (velocidade de projeto, 20m/s)	72
3.17	Momento aplicado à verga resultante da força de arrasto (velocidade de projeto, 20 m/s)	73
3.18	Diagrama das variáveis em estudo nos ensaios experimentais em túnel aerodinâmico	78
3.19	Relação entre a velocidade de escoamento e a força de arrasto para o modelo à escala em estudo	78
3.20	Base do modelo à escala para os ensaios experimentais	79
3.21	Imagens exemplificativas de diferentes modelos de velas durante os ensaios no túnel aerodinâmico	82
3.22	Momento aplicado à verga resultante da força de arrasto (ensaio em túnel aerodinâmico para velocidade de 10 m/s)	84
3.23	Perfil da força de arrasto para diferentes posições das vergas, resultado da comparação dos vários modelos (0,26 m/s)	87
4.1	Diagrama das principais dimensões do tambor de um cabrestante .	91
4.2	Modelos das diferentes geometrias de cabrestantes disponíveis no mercado	94
4.3	Localização e características da ostaga do velacho alto e do sobre de proa (B1)	95
4.4	Localização e características da ostaga do joanete de proa (E1) . . .	95
4.5	Localização e características dos braços do mastro do Traquete (B2 e E2)	97
4.6	Localização e características da ostaga do joanete (B3)	97

4.7	Localização e características da ostaga da gávea alta e do sobre (E3)	98
4.8	Localização e características dos braços do mastro do Grande (B4 e E4)	99
4.9	Características do carregamento nos aparelhos das ostagas do Traquete (B1 e E1)	101
4.10	Características do carregamento nos aparelhos dos braços do Traquete (B2 e E2)	102
4.11	Características do carregamento nos aparelhos das ostagas do Grande (B3 e E3)	103
4.12	Características do carregamento nos aparelhos dos braços do Grande (B4 e E4)	103
A.1	Navio Alexander Von Humboldt II (mecanização do aparelho vélico)	113
A.2	Navio Alexander von Humboldt II (mecanização do aparelho vélico)	113
A.3	Navio KRI Bima Suci (mecanização do aparelho vélico)	114
A.4	Navio Nve Cisne Branco (mecanização do aparelho vélico)	114
A.5	Navio KRI Dewaruci (mecanização do aparelho vélico)	114
A.6	Navio Lord Nelson (mecanização do aparelho vélico)	115
A.7	Navio Royal Clipper (mecanização do aparelho vélico)	115
A.8	Navio Stavros S Niarchos (mecanização do aparelho vélico)	115
A.9	Navio Golden Horizon (mecanização do aparelho vélico)	116
A.10	Navio Sea Cloud II (mecanização do aparelho vélico)	116
A.11	Navio Gulden Leeuw (mecanização do aparelho vélico)	117
A.12	Navio Wylde Swan (mecanização do aparelho vélico)	117
E.1	Normas das principais sociedades classificadoras	153
G.1	Vela rígida bidimensional numa projeção frontal, modelada em <i>Solidworks</i>	159
G.2	Vela rígida bidimensional numa projeção isométrica, modelada em <i>Solidworks</i>	159
G.3	Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo horizontal) numa projeção frontal, modelada em <i>Solidworks</i>	160
G.4	Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo horizontal) numa projeção isométrica, modelada em <i>Solidworks</i>	160
G.5	Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical) numa projeção frontal, modelada em <i>Solidworks</i>	161
G.6	Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical) numa projeção isométrica, modelada em <i>Solidworks</i>	161

G.7	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (projeção ortogonal)	163
G.8	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (projeção vertical)	163
G.9	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (bordo de ataque)	164
G.10	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (bordo contrário)	164
G.11	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 17° (projeção ortogonal)	164
G.12	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 17° (projeção vertical)	165
G.13	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 17° (bordo de ataque)	165
G.14	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 17° (bordo contrário)	165
G.15	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 28° (projeção ortogonal)	166
G.16	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 28° (projeção vertical)	166
G.17	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 28° (bordo de ataque)	166
G.18	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 28° (bordo contrário)	167
G.19	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 45° (projeção ortogonal)	167
G.20	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 45° (projeção vertical)	167
G.21	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 45° (bordo de ataque)	168
G.22	Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 45° (bordo contrário)	168
G.23	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 62° (projeção ortogonal)	168
G.24	Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 62° (projeção vertical)	169

G.25 Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 62° (bordo de ataque)	169
G.26 Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 62° (bordo contrário)	169
H.1 Modelo de uma vela rígida bidimensional numa vista frontal	171
H.2 Modelo de uma vela rígida bidimensional numa vista posterior . . .	171
H.3 Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal) numa vista frontal	172
H.4 Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal) numa vista posterior	172
H.5 Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo vertical) numa vista frontal	173
H.6 Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo vertical) numa vista posterior	173
H.7 Modelo de uma vela flexível tridimensional numa vista frontal . . .	174
H.8 Modelo de uma vela flexível tridimensional numa vista posterior . .	174
H.9 Procedimento de determinação do atrito associado ao equipamento de ensaios experimentais	176
H.10 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) numa posição perpendicular ao escoamento	181
H.11 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) numa posição perpendicular ao escoamento	181
H.12 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 17 graus da perpendicular ao escoamento	182
H.13 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 17 graus da perpendicular ao escoamento	182
H.14 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 28 graus da perpendicular ao escoamento	183
H.15 Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 28 graus da perpendicular ao escoamento	183

H.16	Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 45 graus da perpendicular ao escoamento	184
H.17	Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 45 graus da perpendicular ao escoamento	184
H.18	Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 62 graus da perpendicular ao escoamento	185
H.19	Características do escoamento externo numa vela tridimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 62 graus da perpendicular ao escoamento	185
I.1	Dimensões principais dos modelos das diferentes geometrias de cabrestantes disponíveis no mercado	191

Lista de Tabelas

2.1	Dimensões Gerais do N.E. “Sagres”	18
2.2	Denominações do plano vélico do N.E. “Sagres”	19
2.3	Nomenclatura dos cabos utilizados na manobra do velame	21
2.4	Manobras determinantes para cada aparelho de força	40
2.5	Requisitos para a gama de funcionamento do aparelho vélico	41
3.1	Cálculo da força correspondente a cada manobra	49
3.2	Dimensionamento dos aparelhos de força através da força resultante do número de pessoas associado a cada manobra	50
3.3	Dimensionamento dos aparelhos de força através da tensão de rutura dos cabos	52
3.4	Tensões admissíveis no suporte das vergas aos mastros	52
3.5	Dimensionamento dos aparelhos de força através das tensões admissíveis definidas pelas Sociedades Classificadoras	53
3.6	Força Aplicada aos cabos devido às cargas aerodinâmicas na vela	54
3.7	Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através das normas das Sociedades Classificadoras	54
3.8	Massa Considerada para cada Vela	56
3.9	Força aplicada a cada verga de içar	56
3.10	Dimensionamento dos aparelhos de força (ostagas) através do cálculo analítico em condições normais de funcionamento	56
3.11	Massa considerada para cada vela com a adição da acumulação da massa de gelo	57
3.12	Força aplicada a cada verga de içar (condições extremas)	57
3.13	Dimensionamento dos aparelhos de força (ostagas) através do cálculo analítico em condições extremas de funcionamento (gelo)	58
3.14	Massa Considerada para cada Vela	58
3.15	Massa considerada para cada vela com a adição da acumulação da massa de gelo	59
3.16	Ângulos dos braços em diferentes posições das vergas do mastro do Grande	59

3.17	Ângulos dos braços em diferentes posições das vergas do mastro do Traquete	60
3.18	Força de atrito na manobra de bracear em condições normais de funcionamento	61
3.19	Força de atrito na manobra de bracear em condições extremas (acumulação de gelo)	62
3.20	Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através do cálculo analítico da força de atrito	62
3.21	Forças de arrasto calculadas analiticamente para várias velocidades de escoamento	64
3.22	Força aplicada aos cabos devido às cargas aerodinâmicas, obtidas através da simulação CFD para a velocidade de projeto	74
3.23	Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através das normas das forças aerodinâmicas obtidas na simulação CFD	76
3.24	Síntese do cálculo de forças aplicadas no aparelho vélico (ostagas) .	88
3.25	Síntese do cálculo de forças aplicadas no aparelho vélico (braços) . .	88
4.1	Coeficiente das Tensões Admissíveis	91
A.1	Lista de navios que possuem mecanização do aparelho vélico	118
B.1	Documentação Técnica Disponibilizada pela Direção de Navios . . .	119
C.1	Dados de Entrada Relativos ao Aparelho Vélico	121
D.1	Índice dos cabos de manobra do velame do N.E. “Sagres”	130
E.1	Nomenclatura do aparelho vélico e a equivalência para a Marinha Portuguesa	154
F.1	Manobras correspondentes a cada aparelho de força	157
G.1	Coeficiente de arrasto para a vela grande, obtido através da simulação CFD para diferentes velocidades e posições da verga	162
H.1	Determinação da constante de elasticidade da mola utilizada para medição das forças nos ensaios experimentais	175
H.2	Procedimento de determinação do atrito associado ao equipamento de ensaios experimentais	176
H.3	Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida bidimensional	177

H.4	Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida tridimensional (curvatura eixo vertical)	178
H.5	Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida tridimensional (curvatura eixo horizontal)	179
H.6	Registos das extensões da mola do modelo da vela flexível	180
H.7	Cálculo das forças aerodinâmicas e respetivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida bidimensional	186
H.8	Cálculo das forças aerodinâmicas e respetivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo vertical)	187
H.9	Cálculo das forças aerodinâmicas e respetivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal)	188
H.10	Cálculo das forças aerodinâmicas e respetivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela flexível tridimensional	189
I.1	Estudo do Mercado - cabrestante MAXWELL VC32	192
I.2	Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10	193
I.3	Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10P	194
I.4	Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10L/NL	195
I.5	Estudo do Mercado - cabrestante GLEN ENGINEERING Free Standing Capstan	196
I.6	Estudo do Mercado - cabrestante SCAM Marine VPV2-K1H-k	197
I.7	Estudo do Mercado - cabrestante MUIR VC22000	198
I.8	Estudo do Mercado - cabrestante MUIR VC22000	199
I.9	Estudo do Mercado - cabrestante Towimor Mooring Capstan G1A	200
I.10	Estudo do Mercado - cabrestante Emcé EMC130E	201
I.11	Estudo do Mercado - cabrestante Emcé EMC130E	202
K.1	Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1	223
K.2	Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1 (continuação)	224
K.3	Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1 (continuação)	225
K.4	Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1 (continuação)	226
K.5	Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2	227
K.6	Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2 (continuação)	228
K.7	Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2 (continuação)	229
K.8	Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2 (continuação)	230
K.9	Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3	231

K.10	Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3 (continuação)	. .	232
K.11	Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3 (continuação)	. .	233
K.12	Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3 (continuação)	. .	234
K.13	Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4	. .	235
K.14	Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4 (continuação)	. .	236
K.15	Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4 (continuação)	. .	237
K.16	Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4 (continuação)	. .	238

Lista de Abreviaturas

ABS	A merican B ureau of S hipping
BV	B ureau V eritas
CFD	C omputational F luid D ynamics
DNV	D et N orske V eritas
FSI	F luid- S tructure I nteraction
LR	L loyd's R egister of Shipping
MBF	M inimum B reaking F orce
NE	N avio E scola
RANS	R eynolds- A veraged N avier S tokes
VPP	R eal-Time V elocity P rediction P rogramme
WAPS	W ind A ssisted P ropulsion S ystems
WPS	W ind P ropulsion S ystems

Lista de Símbolos

L_{oa}	Comprimento fora a fora	m
L_{pp}	Comprimento entre perpendiculares	m
B_{max}	Boca máxima	m
D_{cons}	Pontal de construção	m
WL	Altura da linha de água	m
WT	Vento verdadeiro	m s^{-1}
WA	Vento aparente	m s^{-1}
AWA	Ângulo do vento aparente	°
V	Velocidade do vento aparente	m s^{-1}
S	Área velica	m^2
S_{modelo}	Área velica modelo à escala	m^2
A_{tunel}	Área do túnel aerodinâmico	m^2
D_c	Comprimento característico	m
m_{vela}	Massa da vela	kg
m_{verga}	Massa da verga	kg
l_{verga}	comprimento da verga	m
θ_i	Posição inicial da verga	°
θ_L	Ângulo longitudinal da verga	°
θ_H	Ângulo horizontal da verga	°
Re	Número de Reynolds	-
ρ	Densidade do ar	kg/m^3
μ	Viscosidade do fluido	kg/(ms)
g	aceleração gravítica	m/s
$P_{dinamica}$	Pressão dinâmica	Pa
$P_{estatica}$	Pressão estática	Pa
P_{total}	Pressão total	Pa
F_L	Força de sustentação	N
F_D	Força de arrasto	N
C_L	Coefficiente de sustentação	-
C_D	Coefficiente de arrasto	-
F_{sh}	Força aerodinâmica controlado por um cabo	N

F_{sail}	Força aerodinâmica na vela	N
F_{verga}	Força na extremidade da verga (cargas gravitacionais)	N
$F_{aeroverga}$	Força aerodinâmica na extremidade da verga	N
$F_{aerocabos}$	Força aerodinâmica transferida aos cabos	N
X_{cp}	Distância entre o eixo da verga e o centro de pressão	m
M_{verga}	Momento rotacional da verga	N m
F_a	Força de atrito	N
μ_a	Coefficiente de atrito	-
K_{mola}	Constante de elasticidade da mola	-
$l_{média}$	Extensão média da mola	m
$l_{esperada}$	Extensão teórica da mola	m
$l_{s\backslash atrito}$	Extensão sem considerar o atrito da mola	m
$l_{c\backslash atrito}$	Extensão considerando o atrito da mola	m
σ_{py}	Tensão de cedência do parafuso	MPa
σ_{pu}	Tensão última do parafuso	MPa
σ_{cy}	Tensão de cedência da chapa	MPa
σ_{cu}	Tensão última da chapa	MPa
d	Diâmetro dos furos	mm
d_0	Diâmetro dos parafusos	mm
d_m	Diâmetro médio da cabeça do parafuso	mm
e_1	Distância ao topo	mm
e_2	Distância ao bordo lateral	mm
p_1	Espaçamento no sentido do esforço	mm
p_2	Espaçamento perpendicular ao esforço	mm
L_v	Comprimento da fiada de parafusos	mm
$L_{v, eff}$	Comprimento de corte eficaz	mm
$A_{v, eff}$	Área de corte eficaz	mm ²
A_s	Área da secção resistente do parafuso	mm ²
t_p	Espessura da chapa sob o parafuso	mm
t	Espessura da peça de ligação	mm
n	Número de parafusos	mm
P	Força estática (aparelho de força)	N
P_z	Componente vertical da força estática (aparelho f.)	N
P_y	Componente horizontal da força estática (aparelho f.)	N
P_x	Componente da força estática normal ao plano (aparelho f.)	N
θ	Ângulo de elevação da força	°
ϕ	Ângulo de desvio da força	°

α_i	Coefficiente parcial de segurança i (Euro-Código 3)	-
γ_{Mi}	Coefficiente parcial de segurança i (Euro-Código 3)	-
k_{Mi}	Coefficiente parcial de segurança i (Euro-Código 3)	-
n_a	Número de planos de atrito	-
$V_{eff, Rd}$	Resistência da chapa ao corte	kN
V_{Sd}	Força de corte no estado limite de utilização	kN
$F_{V, Rd}$	Resistência dos parafusos ao corte	kN
$F_{b, Rd}$	Resistência dos parafusos ao esmagamento	kN
$F_{V, Sd}$	Força de corte no parafuso no estado limite de utilização	kN
B_p, Rd	Resistência dos parafusos ao punçoamento	kN
F_t, Rd	Resistência dos parafusos à tração	kN
F_t, Sd	Força de tração no parafuso no estado limite de utilização	kN
F_p, C	Pré-esforço	kN
F_s, Rd, ser	Resistência ao escorregamento	kN

Introdução

Motivação

O NE “Sagres” é considerado um dos símbolos da Marinha Portuguesa e um dos mais aclamados pelo povo português, que mostra um grande orgulho no navio que leva Portugal aos quatro cantos do mundo e onde inclusive alguns já cumpriram serviço militar a bordo. Tratando-se de um navio à vela de grande porte e principalmente pela forma tradicional (à força de braços) como é operado, requer uma guarnição relativamente numerosa.

No entanto, atualmente a Marinha Portuguesa tem sofrido uma redução de militares em serviço efetivo, situação que já se faz sentir nos navios, incluindo na “Sagres”, onde a redução é significativa e preocupante. Numa situação limite, esta redução de elementos da guarnição, poderá pôr em causa a execução em segurança de algumas das manobras do aparelho vélico.

Este estudo visa o projeto de mecanização de algumas das manobras através de aparelhos de força mecânicos, com o intuito de reduzir a necessidade de utilização de equipas muito numerosas em algumas manobras, nomeadamente as que requerem um elevado número de executantes. Assim, será possível reduzir a quantidade de elementos da guarnição dedicados a este tipo de fainas.

Por outro lado, tem-se verificado uma tendência para efetuar este tipo de intervenções em navios com características semelhantes, tanto de cariz militar como civil, incluindo navios da mesma época e até da mesma classe. Porém, nem sempre se tem optado pelas melhores soluções, pelo que existe a necessidade de estudar aprofundadamente as várias alternativas de implementação destes sistemas, para o navio em questão, isto porque, devido à diversidade dos aparelhos vélicos as necessidades são significativamente distintas e exclusivas.

Objetivos

Com este estudo pretende-se avaliar a viabilidade da instalação de equipamentos que substituindo o recurso aos elementos da guarnição que operam este tipo

de aparelhos, e permitam numa redução da necessidade de recursos humanos do navio. Consequentemente obter-se-ia uma redução de custos que em última instância permitiria navegar mais, com os mesmos recursos financeiros. Por outro lado, um projeto e implementação adequados, poderão contribuir para uma maior segurança e fiabilidade do sistema de manobra e navegação à vela, reduzindo-se também o risco de acidentes.

Estrutura da Dissertação

Este estudo inicia-se com a identificação da necessidade, através de uma caracterização da questão que motivou o desenvolvimento do projeto. A especificação da necessidade, encontra-se na definição do problema. Este ponto inclui todos os dados de entrada, conhecimentos existentes e as ferramentas disponíveis para solucionar a questão levantada. Esta fase do estudo culminou na elaboração do projeto preliminar, isto é, a conceptualização da solução adotada e inclui os requisitos iniciais do projeto.

A análise do problema foi fundamentada essencialmente na determinação das forças aplicadas ao sistema, por forma a definir as capacidades necessárias dos equipamentos que se pretende instalar. Para este processo foram definidos vários modelos de cálculo aplicados aos vários tipos de cargas assumidas.

Após o cálculo dos esforços aplicados, seguiu-se o projeto conceptual com a materialização da solução analisada, a nível da configuração, funcionamento e instalação.

No final do estudo foram retiradas algumas conclusões, evidenciando os aspetos mais importantes do trabalho, e mencionados possíveis projetos futuros com este estudo como ponto de partida.

Capítulo 1

Identificação da Necessidade

A evolução tecnológica levou, ao longo dos tempos, a uma alteração constante ao nível da modo como o ser humano utiliza o meio aquático para se deslocar. Inicialmente, recorria-se à força humana que foi substituída gradualmente pela navegação à vela. Nos últimos quinhentos anos foi possível observar o apogeu da navegação à vela e o seu declínio devido à implementação da propulsão mecânica nos navios. Apesar deste facto, é evidente que a oferta destes dois modos de propulsão enquadra-se em domínios distintos, provado pela existência atual de uma procura diferenciada dos navios à vela pelo seu cariz histórico, pela beleza reconhecida, ou mesmo por razões ambientais, representando um meio de propulsão ecologicamente sustentável que é crucial para a evolução da descarbonização global que atualmente representa um dos objetivos principais de vários países desenvolvidos.

À parte de toda a ciência exata aplicada na navegação, a principal fonte de informação nestes navios é o conhecimento empírico transmitido essencialmente de uma forma verbal de guarnição em guarnição. Uma interrupção na transmissão deste conhecimento poderia resultar numa perda considerável ou mesmo irrecuperável.

Um caso concreto da aplicação dos veleiros são os navios-escola. Nestes navios os cadetes são sujeitos à rotina diária e às tarefas gerais associadas à navegação e manutenção da plataforma. As características exclusivas dos veleiros permitem um contacto direto com as componentes ambientais, como o vento e a ondulação e a forma como estas afetam a manobra do navio. Por outro lado, devido à interação necessária entre os vários elementos da guarnição durante as diferentes atividades desenvolvidas durante as navegações, que tradicionalmente representam longos períodos, proporcionam o desenvolvimento do trabalho em equipa e do espírito de marinheiro.

O N.E. “Sagres”, além de navio-escola dos futuros oficiais da Marinha Portuguesa, assume uma elevada importância e prestígio junto da comunidade civil.

Abrangendo sucessivas gerações de portugueses que se sentem representadas por este navio que leva consigo uma nação inteira aos quatro cantos do mundo. Assim sendo, é imprescindível que este continue a navegar.

No entanto, a continuidade destes navios poderá encontrar-se ameaçada, integrada no paradigma atual da evolução tecnológica, e o caso concreto do N.E. “Sagres”, que enfrenta várias falhas a nível de recursos humanos. Por forma a preservar a navegação à vela deste tipo de veleiros chamados de *"Tallships"*, é necessário reinventar o conceito, salvaguardando a cultura e a tradição que lhes estão associadas.

É necessário dotar estes navios com as capacidades que lhe permitam uma forma de navegação sustentável, eficaz, rentável e resguardada de perigos a nível pessoal e material, nomeadamente em condições meteorológicas adversas, e em simultâneo, preservar as características exclusivas deste navio, como a história e as memórias, como parte integrante do desenvolvimento. Face a esta necessidade, neste trabalho, pretende-se desenvolver um estudo de implementação de aparelhos de força, de modo a mecanizar as manobras do velame do N.E. “Sagres”.

Definiram-se três elementos essenciais nos quais se considera que a evolução tecnológica referida se deve fundamentar: segurança, eficiência e tecnologia (Figura 1.1). Apesar da presumível separação dos conceitos, importa referir que na prática existe uma interligação significativa entre eles.

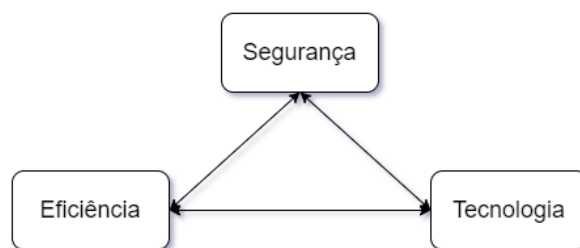


FIGURA 1.1: Diagrama da evolução do conceito da navegação à vela.

Segurança

De um modo geral e em particular na Marinha Portuguesa as questões relacionadas com a segurança surgem como a componente principal de todas as decisões e ações. Posto isto, é fundamental encontrar soluções que permitam, da forma mais eficaz possível, salvaguardar os elementos da guarnição e a própria plataforma.

Esta matéria é manifestamente pertinente em veleiros como o N.E. “Sagres” com uma considerável vulnerabilidade às condições atmosféricas adversas e cujos trabalhos da guarnição decorrem essencialmente no exterior do navio, independentemente das situações mais desfavoráveis para o desempenho das suas funções.

A mecanização de algumas manobras do aparelho vélico, tornará as tarefas da guarnição mais eficientes, o que levará à diminuição da exposição dos militares a estas condições. Para além deste facto, o funcionamento destes equipamentos é independente das condições atmosféricas, ao contrário dos recursos humanos, cujo desempenho se degrada com o agravamento do estado do mar.

Por outro lado, a redução do número de elementos necessários para executar determinadas manobras poderá levar a situações de insuficiência numérica em ocorrências críticas. Pelo que é necessário acautelar a utilização dos equipamentos e considerar sistemas complementares de segurança para a manobra dos mesmos.

Eficiência

Em relação aos restantes navios da Marinha Portuguesa, o N.E. “Sagres”, por norma, apresenta uma exigência de recursos humanos superior. Esta necessidade decorre, em parte, do carácter manual da maioria das ações necessárias à manobra do navio. Um exemplo desta situação, e referido no ponto anterior, é o aparelho vélico que requer uma guarnição relativamente grande.

A operação do navio depende de toda uma guarnição numerosa com funções bastante diferenciadas ao nível da sua manobra. Esta questão levantará algumas dificuldades por parte da Marinha Portuguesa dentro do atual paradigma de dificuldades no recrutamento e consequente escassez de militares disponíveis.

A instalação de equipamento que possa substituir alguns dos elementos que opera este tipo de aparelhos, pode levar a uma redução do número de elementos da guarnição do navio. Consequentemente obter-se-ia uma redução de custos, que em última instância poderá permitir navegar mais, com os mesmos recursos financeiros.

Tecnologia

Os mais variadíssimos setores tiveram necessidade de evoluir por forma a acompanhar o desenvolvimento tecnológico que ocorre, atualmente, a uma velocidade vertiginosa. As áreas que não têm capacidade para avançar neste sentido acabam por não conseguir competir com novas soluções, podendo tal situação levar

ao seu desaparecimento. É neste sentido que é fundamental tomar partido da tecnologia por forma a reinventar a navegação à vela, mantendo-a igualmente competitiva e atrativa.

Neste âmbito, por forma a desencadear uma evolução bem sustentada e de forma positiva é necessário primeiramente estudar o melhor método de adaptar a tecnologia às pessoas e posteriormente adaptar as pessoas à tecnologia. Este trabalho pretende desenvolver as duas vertentes descritas anteriormente.

Posto isto, é essencial um bom estudo do projeto inicial por forma criar as soluções que da melhor forma correspondam às necessidades das pessoas e da plataforma. Por outro lado, é indispensável gerar condições favoráveis à sua utilização e manutenção por parte dos elementos da guarnição.

Capítulo 2

Definição do Problema

Neste capítulo pretende-se definir de forma concreta a problemática em estudo e como se tenciona solucionar a questão levantada anteriormente. Com este objetivo, neste ponto será possível verificar todas as fontes e o pré-processamento dos dados de entrada de modo a completar os requisitos estabelecidos, culminando no anteprojeto que será alvo de análise no próximo capítulo.

2.1 Revisão Bibliográfica

Num estudo dominado pelo avanço e emprego da tecnologia, é necessário primeiramente relembrar a história da propulsão dos navios e em especial a evolução da utilização do vento para fins propulsivos como um meio primário ou assistido.

2.1.1 Evolução Histórica dos Meios de Propulsão

Época dos Navios a Remo

Antes do Homem se tornar sedentário, no período pré-neolítico, acredita-se que este já se encontrava adaptado ao meio aquático, utilizando algum tipo de material flutuante como meio de transporte sobre a água. Durante um período de mais de quarenta mil anos, a força humana era o principal meio de propulsão, utilizando objetos idênticos a remos, numas situações mais sofisticados e noutras menos complexos (Röder, 2008).

Até que uma inovação alterou drasticamente o rumo da história da civilização. Acredita-se que tenha sido no Egito, por volta de 3000 A.C. que pela primeira vez se recorreu ao vento como meio de propulsão através de velas. Tornando-se assim possível, para além da navegação anteriormente restringida ao rio Nilo, as expedições pelo Mar Vermelho e Mediterrâneo (Röder, 2008).



FIGURA 2.1: Navios de guerra romanos com velas e remos em simultâneo (200 A.C.) (Röder, 2008).

No entanto, a história comprova que o ser humano sempre se demonstrou conservador na aplicação da inovação. Esta matéria não foi exceção. Inicialmente o vento integrava um meio híbrido de propulsão através de velas redondas ou latinas, sendo que o principal, continuava a ser constituídos pelos remos. Na Figura 2.1, é possível observar navios de guerra romanos com os dois meios de propulsão instalados em simultâneo.

A Época dos Navios a Remos perdurou até 1650 D.C., representando o período mais longo da navegação marítima, sendo posteriormente substituída pela "Idade da Vela". Durante esta fase existiram essencialmente dois tipos de navios: o navio redondo, com objetivos comerciais, e a galé, com uma finalidade direcionada para a guerra.

Idade da Vela

Com o início da "Idade da Vela", com o desaparecimento dos remos, e a necessidade de uma maior capacidade de carga e de pessoas, os navios evoluíram tornando-se cada vez maiores e com maior número de mastros. Inicialmente, no mediterrâneo, os navios redondos e as galés, ambos essencialmente equipados com velas latinas, prosperavam de uma forma significativa. Enquanto no norte da Europa predominavam navios de casco chato e velas redondas (Infopédia, 2022).

Como resultado da prosperidade das expansões marítimas dos países europeus durante os séculos XV e XVI, surgiram várias tipologias de navios à vela,

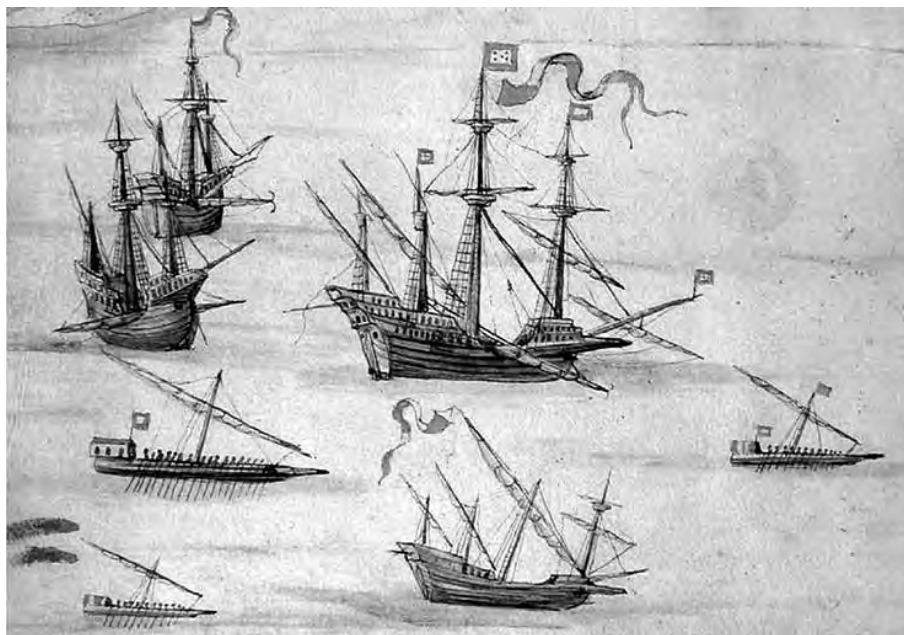


FIGURA 2.2: Os principais navios portugueses do segundo quartel do século XVI: galeão no plano central, naus de três mastros, embarcações do tipo da galé e do bergantim, com uma caravela redonda em primeiro plano (Roteiros de D. João de Castro) (Domingues, 2004).

nomeadamente a barca, como referido anteriormente, originária das zonas do norte da Europa. O barinel, é idêntico à barca, com maior capacidade de carga surge ainda em alguns casos com a possibilidade de implementação de remos. A caravela surgiu como uma solução para a navegação na costa africana podendo navegar a bolinas mais cerradas, possibilitando a navegação numa maior amplitude de ventos. Este tipo de navios eram inicialmente constituídos por dois a três mastros com velas latinas, evoluindo com o tempo para outras configurações, como a caravela redonda que permitia a utilização de velas redondas num dos mastros (Domingues, 2004).

Com a viagem de Vasco da Gama à Índia, a nau passou a destacar-se perante os outros navios, pela sua enorme capacidade de carga. Em termos de aparelho vélico, possuía três mastros, dos quais dois com velas redondas e um com velas latinas. Na Figura 2.2 é possível observar uma representação gráfica de alguns dos navios portugueses do século XVI (Domingues, 2004).

Até ao século XIX, o desenvolvimento das técnicas e dos equipamentos da navegação à vela ocorreu de uma forma gradual e progressiva. No entanto, neste século, a revolução industrial originou uma nova evolução vertiginosa na construção naval. Com a invenção da máquina a vapor, acreditava-se que os navios à vela teriam o seu final próximo.

Navios com Propulsão Mecânica

No século XIX ocorreu uma enorme evolução tecnológica. Os navios aumentaram em dimensão e tornam-se mais complexos, fruto da tecnologia da máquina a vapor, que permitia movimentar maiores massas não estando dependente do vento para tal, e da transição da construção naval em madeira para o ferro (Röder, 2008).

Os primeiros navios a vapor surgem logo no início do século XIX, no entanto, a propulsão mecânica encontrava-se ainda numa forma muito incipiente, recorrendo a rodas de pás para fornecer o impulso ao navio (Costa, 2013). Logo após esta evolução, em 1820, é lançado o primeiro navio em ferro, na Inglaterra. Ainda em meados do século, ocorrem as primeiras aplicações do hélice em substituição das rodas de pás. Esta transição veio ainda reforçar a ideia de que a máquina a vapor seria o caminho certo para a evolução, no entanto, grande parte dos navios ainda utilizava um modo de propulsão híbrido. A vela ainda representava um modo mais económico de propulsão (Figura 2.3). Os navios apenas deixaram de ser concebidos com mastros já no século XX.

A própria máquina a vapor sofreu uma evolução, inicialmente sob a forma de uma máquina alternativa, progredindo para turbinas a vapor. De seguida deu-se a aplicação de máquinas de combustão interna como meio de propulsão (motor diesel). Estas tipologias de motores têm vindo a sofrer algumas melhorias e atualmente encontra-se generalizados por todo o género de navios. A propulsão elétrica e nuclear também tem vindo a ganhar terreno embora em soluções mais específicas (Röder, 2008).

De uma forma geral, a propulsão mecânica encontra-se já perfeitamente

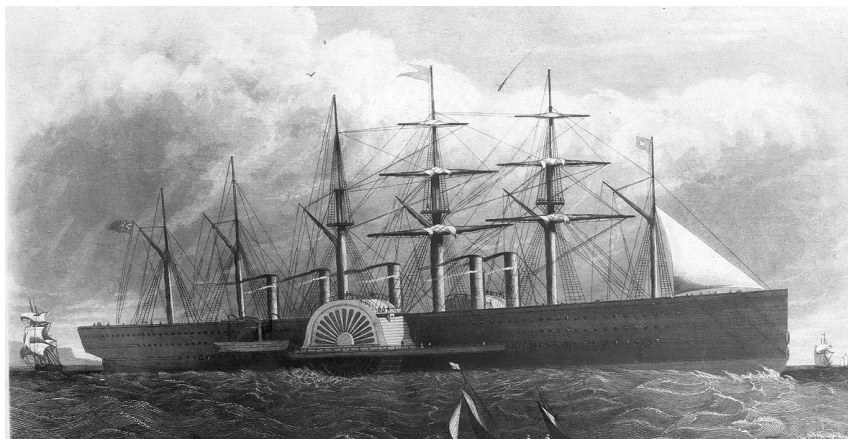


FIGURA 2.3: SS Great Eastern (1866) (Bryant, 2011).

consolidada e demonstrou a sua viabilidade. No entanto a evolução é permanente e segue no sentido de obter maiores rendimentos com menores consumos, menores vibrações e ruído, e essencialmente, integrado no paradigma atual, na tentativa de reduzir a poluição característica dos navios de grande porte na queima de combustíveis fósseis.

2.1.2 Perspetiva Futura para os Meios de Propulsão

Os principais desenvolvimentos dos meios de propulsão alinham-se atualmente, com a tendência global numa transição para uma economia verde. O principal objetivo é a redução da libertação de gases poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis.

A evolução neste sentido ainda é incerta. Até ao momento não foi traçado um caminho definitivo para a descarbonização da produção de energia. À semelhança do que se verifica no ramo automóvel, existem alguns desenvolvimentos por forma a aplicar a energia elétrica como fonte primária para a propulsão dos navios. No entanto, este tipo de tecnologia ainda não está perfeitamente adaptado à realidade de alguns tipos de navios, nomeadamente os navios de carga, existindo problemas essencialmente na capacidade de armazenamento da energia.

Uma nova "Idade da Vela"

No seguimento do objetivo traçado para a redução das emissões por parte dos navios, é possível observar os desenvolvimentos de alguns projetos que retomam a antiga ideia do recurso à energia do vento.

Uma lição que se poderá retirar das grandes evoluções nos meios de propulsão, que foram referidas anteriormente, é que se trata de um processo moroso e progressivo, sempre antecedido de um estado inicial caracterizado por uma aplicação híbrida. Os projetos realizados atualmente neste âmbito, ainda se encontram neste modo preliminar, com alguns meios de propulsão que recorrem à energia do vento instalados em combinação com outras formas de propulsão mecânica. Esta situação é resultado de várias questões que ainda necessitam de ser solucionadas e alvo de estudo por parte da engenharia.

A visão de retornar aos navios à vela como meio preferencial de transporte de mercadoria e passageiros pode ser observada atualmente em vários estágios de desenvolvimento e com conceitos bastante distintos. Existem alguns projetos menos complexos em que são utilizados veleiros na sua conceção habitual, idênticos aos que se observavam até ao século XIX, e outras propostas mais sofisticadas com a



FIGURA 2.4: *C 320 Kite* um modo pioneiro nos métodos de propulsão assistidos por vento (SkySails Marine, s.d.).

instalação de rotores ou velas em navios contemporâneos (NAUTILUS International, 2021).

Um dos exemplos é a empresa sediada nos Países Baixos, *FairTransport*, cuja missão denominada de “*Cargo Under Sail*” tem como objetivo a utilização de *Tallships* para transportar mercadoria tradicional de alguns países. A ideia ainda não é comercialmente viável por si só, pelo que necessita de complementar a sua atividade com o transporte de passageiros numa conceção idêntica de um navio-escola. De uma forma geral, é admitido que estes tipos de projetos são insuficientes para substituir todos os navios de carga que operam atualmente, pelo que é necessário o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes (Fairtransport, 2022).

Neste sentido existem outras soluções para este tipo de aplicações. A empresa *SkySails*, desenvolveu o *C 320 Kite* (Figura 2.4) que pode ser instalado em qualquer navio, de carga ou passageiros, convencional reduzindo entre dez e trinta e cinco por cento da energia necessária para mover o navio. A forma do *Kite* permite obter eficiências de cerca de vinte e cinco vezes superior aos de uma vela redonda tradicional (SkySails Marine, s.d.).

Outra conceção desenvolvida para este efeito é a utilização de cilindros de grandes dimensões que são colocados em rotação através de energia elétrica. Este movimento gera diferenças de pressão, conhecidas como o efeito de Magnus, que à semelhança das velas tradicionais, produz uma força de sustentação no sentido do movimento do navio. A empresa *Norsepower* tem sido pioneira na implementação



FIGURA 2.5: Navio da marinha mercante com instalação de *rotor sails* (Norepower, s.d.).

destes sistemas, denominados de *rotor sails* (Figura 2.5), que já foram implementados em várias classes de navios de reputadas companhias no ramo marítimo, como a *Maersk*, *Sea-Cargo* e a *Viking Line* (Norepower, s.d.).

Para além destes desenvolvimentos existem outras tentativas para utilização da energia do vento como meio de propulsão secundário para vários géneros de navios. Estas soluções podem ainda apresentar-se com diferentes aspetos, como velas rígidas ou flexíveis. Contudo, por forma a tornar estes projetos atrativos é necessário responder a algumas questões dos principais armadores, tais como a redução da capacidade de carga. Os principais problemas que igualmente se colocam no âmbito da aplicação desta tecnologia, assentam na necessidade de mais elementos e de qualificações para operar este tipo de equipamentos, no entanto, neste sentido tem ocorrido avanços, por forma a mecanizar a sua manobra com vista a serem operados de forma remota (NAUTILUS International, 2021).

Automatização dos Aparelhos Vélcos

A necessidade de um elevado número de elementos da guarnição é uma questão que do mesmo modo se coloca aos veleiros tradicionais como os *Tallships*. Estes navios encontram-se equipados com aparelhos vélcos complexos manobrados à mão por guarnições necessariamente numerosas, em navegações tipicamente de longa duração. Neste sentido, existe nestes navios um desenvolvimento paralelo, aos



FIGURA 2.6: KRI Bima Suci (2017), o navio-escola da Marinha da Indonésia com aparelhos de força para manobra do equipamento vélico (Aseanrecords.worlds, 2019).

sistemas referidos anteriormente, por forma a automatizar os aparelhos vélicos reduzindo a quantidade de força humana associada à sua manobra e consequentemente diminuindo o número de pessoas necessárias, tornando-os mais eficientes e seguros.

O primeiro navio a instalar este tipo de tecnologia por forma a operar mecanicamente parte do aparelho vélico foi o *Preussen* em 1902, reduzindo a sua guarnição a cerca de cinquenta homens, que em navios análogos poderia chegar às duas centenas de elementos (Low tech Magazine, 2009).

Atualmente existem vários veleiros, desde navios-escola até navios de cruzeiro, que já possuem este tipo de tecnologia instalada a bordo (Figura 2.6). Estes navios, são exemplos vivos de como é possível a utilização da força do vento como meio de propulsão de grandes navios e de forma eficiente, consolidando a ideia da implementação de sistemas análogos em navios de maiores dimensões com vantagens económicas e ambientais.

No Apêndice A, é possível observar algumas imagens e uma lista de alguns navios com graus diferentes de mecanização do aparelho vélico. A informação que se retira destas imagens, potencia várias soluções para a definição deste projeto essencialmente ao nível do design e instalação dos aparelhos de força.

2.2 N. E. “Sagres”

De uma perspectiva estratégica, o produto institucional da Marinha Portuguesa pode ser decomposto em três componentes: operacional, científica e cultural. Para a Marinha manter a sua relevância e progredir é necessária uma transformação contínua através de um processo de gestão estratégica. A nível cultural, insere-se o N.E. “Sagres”, que integra as três vertentes principais através da atividade museológica, histórica e de divulgação. As tarefas atribuídas ao navio inserem-se em viagens de instrução de futuros oficiais da armada, comemorações de grande envergadura e no apoio direto à ação diplomática dos órgãos de soberania, no âmbito do funcionamento como embaixada itinerante (Marinha Portuguesa, s.d.).

2.2.1 Nota Histórica

A construção do navio remonta ao ano de 1937 no estaleiros alemães "Blohm & Voss" em Hamburgo, sendo o terceiro navio de um conjunto de quatro construídos a pedido da Marinha Alemã, com o nome de "Albert Leo Schlageter" (Figura 2.7). A missão para a qual foi concebido era idêntica ao serviço que atualmente presta à Marinha Portuguesa, funcionando como um navio escola (Marinha Portuguesa, s.d.).

Durante a Segunda Guerra Mundial, ao realizar uma viagem de instrução no mar Báltico, no dia 14 de novembro de 1944 o navio embateu numa mina de que resultaram danos consideráveis na proa do navio. Na sequência do conflito mundial, foi capturado pelos Estados Unidos da América, nos estaleiros de Bremerhaven, em 1945, onde se encontrava atracado no decorrer do incidente. A captura inseriu-se no âmbito das medidas impostas à Alemanha pelos danos causados aos países Aliados (Marinha Portuguesa, s.d.).

Cerca de três anos depois, foi cedido à Marinha do Brasil operando mais uma vez como navio-escola, com o nome de "Guanabara". Durante doze anos cumpriu a sua missão proporcionando várias viagens de instrução ao longo da costa do Brasil. Até ao ano de 1960, em que iniciaram as negociações entre o Brasil e Portugal por forma a adquirir o navio. A 10 de outubro de 1961 foi assinada a escritura de venda e um ano depois, a 8 de fevereiro de 1962, foi aumentado ao efetivo português com o nome de “Navio Escola Sagres”. Sendo o terceiro navio de instrução com o mesmo nome (Marinha Portuguesa, s.d.).

Após algumas reparações já em território nacional, iniciou a sua missão ao serviço da Marinha Portuguesa na formação técnica e académica dos cadetes,



FIGURA 2.7: Navio Escola Albert Leo Schlageter, lançado à água a 30 de outubro de 1937, nos estaleiros "Blohm & Voss", em Hamburgo (Associação de Portos de Portugal, 2011).

realizando, anualmente, viagens de instrução apenas com algumas exceções para intervenções relacionadas com a sua manutenção. Funcionando como embaixada itinerante, associada à operação como navio-escola, em sessenta anos ao serviço de Portugal já visitou sessenta e um países, praticando um total de duzentos e sessenta e seis portos e fundeadouros estrangeiros, divulgando a cultura portuguesa e a Marinha, nomeadamente junto dos países de língua oficial portuguesa e das comunidades portuguesas no estrangeiro (Marinha Portuguesa, s.d.).

Atualmente não é o único navio da sua Classe a navegar. O primeiro, o "Horst Wessel", faz parte do efetivo da Academia da Guarda Costeira norte americana com o nome de "Eagle". O "Gorch Fock", que chegou a pertencer às autoridades pesqueiras da Ucrânia, recuperou o seu nome, no entanto encontra-se atracado como navio museu. A construção do quarto navio não chegou a ser terminada, embora o seu aparelho tenha sido utilizado para concluir um navio construído em 1958, a partir do mesmo projeto, novamente com o nome de "Gorch Fock". Facto que comprova as boas capacidades do navio. A pedido da Marinha Romena ainda foi construído um quinto navio, o "Mircea"(Marinha Portuguesa, s.d.).

2.2.2 Embarque a Bordo do Navio

De modo a compreender as necessidades do navio e adquirir os conhecimentos necessários sobre a plataforma, nomeadamente do aparelho vélico, foi realizado um embarque de sete dias a bordo do N.E. “Sagres” durante o trânsito de Lisboa para Ponta Delgada, nos Açores. A navegação realizou-se no âmbito da viagem de instrução dos Cadetes de segundo ano da Escola Naval, do dia 3 a 9 de agosto de 2021.

Os objetivos definidos para a viagem tiveram o seu enfoque essencialmente na área do aparelho vélico e na observação da sua manobra. Nos primeiros contactos com a plataforma, foi possível adquirir os conhecimentos gerais do navio, como as suas características principais e a organização a nível dos elementos da guarnição.

Durante os meses do verão, na zona marítima entre o continente e os Açores, devido à localização característica do anticiclone, é frequente encontrar condições atmosféricas favoráveis à prática da navegação à vela. Situação que permitiu, logo após largar da Base Naval de Lisboa, içar algumas das velas. Nestes primeiros momentos, foi possível identificar e observar as principais manobras do aparelho vélico.

Associado ao registo da operação geral do aparelho, efetuou-se uma relação dos vários cabos utilizados em manobras e afinações. Por último, numa vertente mais direcionada para a engenharia, realizou-se um levantamento dimensional de algumas estruturas do aparelho e da sua instalação na plataforma, nomeadamente nos locais onde se previa a necessidade de auxiliar a manobra através de sistemas mecânicos. As características e os dados recolhidos encontram-se descritas nos próximos pontos.

A realização deste embarque culminou na definição dos requisitos iniciais e das necessidades que se pretendia colmatar. Ou seja, o término deste período de contacto com o navio coincidiu com a execução do anteprojecto. A questão fundamental à qual se procurou responder, prendeu-se com a exequibilidade de mecanização das manobras, quer a nível qualitativo quer quantitativo. Isto é, determinar a necessidade e a possibilidade de mecanizar todas ou apenas determinadas manobras.

2.2.3 Características Principais

O N.E. “Sagres” é uma barca com gáveas partidas e mezena partida. Possui um casco de aço com chapas de dez milímetros de espessura. É constituído por dez anteparas estanques, com comunicação interna através de portas estanques hidráulicas que podem ser operadas localmente ou à distância. A entrada para o interior

do navio poderá ser feita pelas superestruturas construídas sobre o convés ou pelos três troncos de fuga existentes ao longo do navio.

Em termos de propulsão, é possível navegar exclusivamente à vela através de um aparelho vélico constituído por dez velas redondas e treze velas latinas, que resultam numa área velica de 2041 metros quadrados, atingindo velocidades até 16,5 nós. Na impossibilidade da navegação à vela ou como uma forma combinada, o navio dispõe de um motor diesel *MTU* com uma potência de 1000 cavalos. Com propulsão mecânica de forma isolada, é possível atingir velocidades de 10 nós. A autonomia do navio é garantida pelos tanques de combustível com 113 mil litros de capacidade que se traduz em trinta dias a navegar com propulsão mecânica.

A produção de energia elétrica é garantida por três grupos geradores diesel *CUMMINS* de 175 kW, sendo transformada em corrente alternada de 380V e 220V e ainda alimentado um circuito de emergência com baterias de corrente contínua de 24V.

Para além dos dados recolhidos durante o embarque, através do contacto com a Direção de Navios da Marinha Portuguesa, foi possível obter documentação técnica variada. Alguns dos documentos disponibilizados que foram utilizados na execução deste projeto encontram-se detalhados no Apêndice B, organizados por âmbitos de aplicação. Em termos dimensionais, as relações principais dos comprimentos do navio encontram-se na Tabela 2.1.

TABELA 2.1: Dimensões Gerais do N.E. “Sagres”

Dimensões Gerais			
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento Fora a Fora (s/ Gurupés)	L_{oa}	81,75	m
Comprimento entre Perpendiculares	L_{pp}	70,20	m
Boca Máxima	B_{max}	12,00	m
Pontal de Construção	D_{cons}	7,30	m

Por forma a operar um navio com esta complexidade, o N.E. “Sagres” dispõe de uma guarnição de cerca de 128 militares em lotação normal, contando com 9 oficiais, 16 sargentos e 103 praças.

2.2.4 Aparelho Vélco

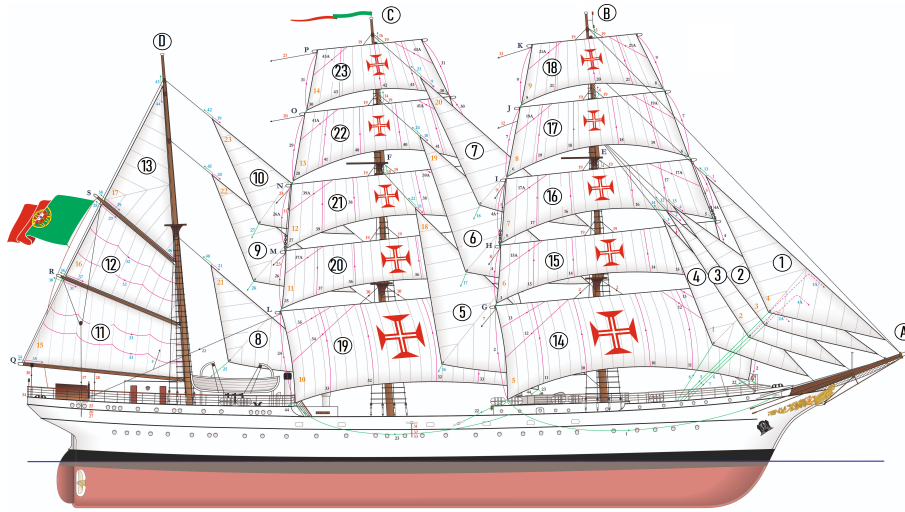


FIGURA 2.8: Plano vélico do N.E. “Sagres” (Marinha Portuguesa, s.d.).

TABELA 2.2: Denominações do plano vélico do N.E. “Sagres”

A	Gurupés	11	Mezena Baixa
B	Traquete	12	Mezena Alta
C	Grande	13	Gave-Topo
D	Mezena	14	Traquete
1	Giba	15	Velacho Baixo
2	Bujarrona de Fora	16	Velacho Alto
3	Bujarrona de Dentro	17	Joanete do Traquete
4	Vela de Estai	18	Sobre do Traquete
5	Estai da Gávea	19	Grande
6	Estai do Joanete	20	Gávea Baixa
7	Estai do Galope do Grande	21	Gávea Alta
8	Estai da Mezena	22	Joanete do Grande
9	Estai do Gave-Topo	23	Sobre do Grande
10	Estai do Galope do Gave-Topo		

O plano vélico do N.E. “Sagres”, constituído pelas referidas 23 velas instaladas em três mastros, das quais 10 são de pano redondo e 13 de pano latino (Tabela 2.2).

As velas denominadas redondas envergam nas vergas dos mastros redondos (Traquete e Grande), numa posição próxima da perpendicular ao navio. As velas latinas, por outro lado, envergam nos estais e seguem uma orientação longitudinal em relação ao navio, podendo ser triangulares, no caso dos entre mastros, ou quadrangulares como as mezenas.

Os mastros, as vergas, a retranca e as caranguejas são construídas a partir de tubos ocos em aço. Os mastros redondos podem ser divididos em mastros reais e mastaréis da gávea e do joanete. No entanto, os mastros reais e os mastaréis da gávea constituem uma peça única, separados dos mastaréis do joanete.

Os mastros redondos e da Mezena não são todos fixos a partir da quilha do navio. O mastro do Traquete assenta na coberta a vante, que se encontra a cerca de 4 metros acima da quilha. O Grande assenta na quilha. O pavimento acima do túnel do veio sustenta a Mezena.

No Apêndice C encontra-se uma listagem dos dados recolhidos a partir da documentação técnica disponibilizada pela Direção de Navios e de documentos analisados durante o embarque no veleiro, que por sua vez também têm origem na instituição referida.

Manobra do Velame do N.E. “Sagres”

Para a manobra do aparelho são necessários inúmeros conjuntos de cabos com funções bastante diferenciadas. Na Tabela 2.3, é possível verificar a nomenclatura dos cabos das ações principais. Tanto nas velas latinas como redondas, no caso do pano se encontrar ferrado, é necessário largá-lo, consistindo numa operação manual e efetuada no local.

De seguida, no sentido de caçar as vergas para um aproveitamento efetivo da energia do vento, é necessário içar as vergas e caçar o pano, cujo processo depende do tipo de vela. Nos mastros redondos, as únicas velas que se encontram fixas são os papafigos (vela grande e traquete) e as gáveas baixas, neste caso, para caçar o pano, recorre-se às amuras e às escotas que vão dar ao punho da escota. As restantes vergas necessitam de ser içadas através das ostagas, e após içadas recorre-se ao mesmo procedimento referido anteriormente para caçar o pano. Nas velas latinas triangulares, tendo em conta que não são fixas às vergas, apenas é necessário içar

TABELA 2.3: Nomenclatura dos cabos utilizados na manobra do velame

Manobra do Velame	
Nomenclatura	Função
Adriças	Içar Pano
Escotas	Caçar Pano
Amuras	Caçar Pano
Carregadeiras	Carregar Pano
Braços	Rotação da Verga
Amantilhos	Afinação Horizontal da Verga
Abraçadeiras	Afinação Horizontal da Verga
Brióis	Carregar Pano
Apagas	Carregar Pano
Talhas de Lais	Carregar Pano
Estingues	Carregar Pano
Ostagas	Içar Verga
Burros / Contra Burros	Posição da Retranca
Guardins	Posição da Carangueja

o pano através das adriças, envergando nos estais. As mezenas envergam entre as vergas, a retranca e as caranguejas, e são içadas através de adriças e caçadas com recurso às escotas.

No processo inverso, é necessário arriar e carregar o pano. Esta operação, nos papafigos, é efetuada através dos estingues que carregam os punhos das vergas, as apagas, as talhas de lais e os brióis de fora e de dentro. Nas restantes velas redondas, recorre-se ao processo contrário realizado para içar as vergas, no entanto, nas velas que têm escotas móveis, é necessário entrar também com os estingues. As velas latinas triangulares são carregadas por carregadeiras únicas que atuam no punho da pena, localizado na parte superior da respetiva vela. As mezenas são carregadas de forma idêntica, neste caso utilizando várias carregadeiras para o punho da pena e da escota, e a valuma.

A operação de orientar as vergas a um bordo ou a outro denomina-se de bracear e recorre-se aos braços que puxam os laises das vergas para ré. A manobra referida é utilizada essencialmente quando o navio navega a efetuar uma popa, e por

forma a otimizar a área velica exposta, colocam-se as vergas num ângulo tentativamente próximo da perpendicular ao escoamento. Nesta operação existe um limite nos ângulos que as vergas podem atingir. O mastro Grande poderá atingir cinco quartas e meia (aproximadamente 62 graus) e o Traquete pode ser braceado até às quatro quartas e meia (aproximadamente 51 graus). Numa operação normal, estes valores não são atingidos pois tal poderia levar à colisão das vergas com o restante aparelho vélico, no entanto, para efeitos de cálculo, estes serão os valores extremos considerados.

No Apêndice D apresenta-se um índice dos vários cabos utilizados na manobra do velame do N.E. “Sagres”, realizado durante o período a bordo do veleiro. Nesta lista os cabos são identificados por um código pelo qual serão referidos ao longo do trabalho apresentado. Para além da nomenclatura do cabo e da sua função, é ainda possível observar algumas características como a bitola e a tipologia do aparelho de força e consequente desmultiplicação. Embora tal não se encontre detalhado nesta tabela, foi efetuado, paralelamente, o registo da quantidade de elementos da guarnição necessários para a manobra de cada cabo em condições normais de operação. Para além dos dados apresentados, foram efetuados alguns desenhos técnicos no âmbito do levantamento dimensional, que serão apresentados ao longo do trabalho.

Numa análise mais genérica sobre as diferentes manobras do aparelho, é possível dividi-las em dois grupos diferentes, considerando o nível de esforço associado: operações com os mastros e vergas e a manobra do pano. Ambos os grupos de ações foram observados durante o embarque no navio, e rapidamente se reconheceu a necessidade de um número mais elevado de elementos da guarnição para as manobras do mastro e das vergas. Através da partilha da informação e do conhecimento empírico dos militares embarcados, definiram-se duas manobras cujo esforço físico da operação é claramente superior às restantes: bracear as vergas das velas dos mastros redondos e a içar as vergas das gáveas através das ostagas.

O facto anterior surge como uma resposta à problemática apresentada como um dos objetivos do embarque no N.E. “Sagres”, que se prendia com a necessidade e exequibilidade de mecanizar todas as manobras, ou a eventualidade de focar em determinadas operações do aparelho e desenvolver um projeto mais versátil e polivalente. No ponto referente ao anteprojecto será referido novamente este facto que revelou uma considerável importância nas decisões tomadas.

2.3 Enquadramento Teórico

2.3.1 Teoria da Navegação à Vela

Devido a fatores cósmicos, como o movimento de rotação e translação da Terra, ou geográficos como a existência de continentes, oceanos, mares e lagos e a altitude, a radiação solar não é absorvida pela superfície terrestre de forma similar. Nos locais onde ocorre um maior aquecimento da superfície o ar desenvolve um escoamento ascendente, originando uma depressão. Por outro lado, nas zonas mais frias verifica-se um escoamento de ar no sentido contrário, criando uma alta pressão. Este fato, origina gradientes de pressão que são os principais responsáveis pelos movimentos das massas de ar, que se denominam vulgarmente por vento.

No entanto, a direção do escoamento de ar não ocorre de forma linear devido aos fatores já referidos, nomeadamente o movimento de rotação da terra que é responsável pelo efeito de Coriolis. Os elementos meteorológicos, neste caso o vento, são consequência da combinação das diferentes condições referidas. Na Figura 2.9 é possível observar o escoamento de ar sobre a superfície terrestre tendo em conta o seu movimento de rotação, sem a influência das características da superfície.

Para além da direção do vento, a intensidade é também resultado dos fatores referidos. Com o aumento do gradiente de pressão, maior será a intensidade do vento. O conhecimento dos efeitos meteorológicos é fundamental para a condução segura da navegação à vela, mantendo o navio resguardado de condições adversas.

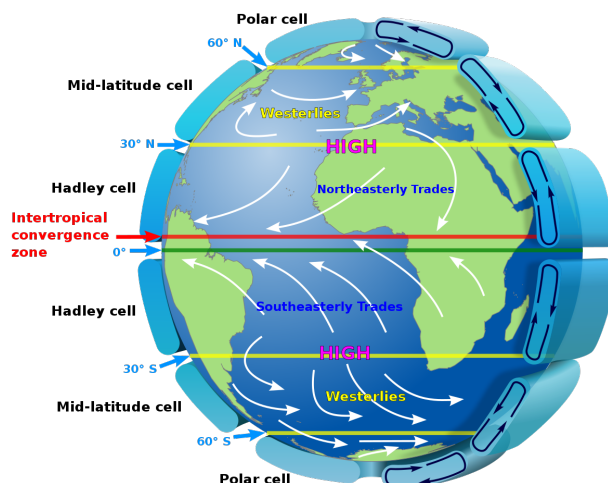


FIGURA 2.9: Modelo do escoamento de ar com a rotação da Terra (NASA, 2005).

Mareações

Já foi referido que, como resultado da evolução da navegação à vela, existem várias tipologias de velas que permitem navegar na direção do escoamento de ar ou no sentido contrário. Navegar em diferentes direções em relação ao vento requer determinadas técnicas denominadas de mareações. As principais e que serão abordadas neste trabalho correspondem a situações em que o vento entra pela zona da popa do navio, denominando-se de popa, e quando se navega no sentido contrário ao escoamento de ar, realizando uma bolina.

No entanto, é necessário ter a consciência que existem outros tipos de mareações, por forma a compreender melhor a análise que será feita tendo em conta os diferentes ângulos de ataque das velas em relação ao vento. Na Figura 2.10, é possível observar um diagrama que representa as possíveis mareações e os limites de bolina para um navio com pano redondo, antecipando já o que será o foco deste trabalho. A principal diferença entre estes navios e os de velas triangulares prende-se com as limitações de navegar em direção a vento, isto é, de realizar bolinas com ângulos de ataque menores.

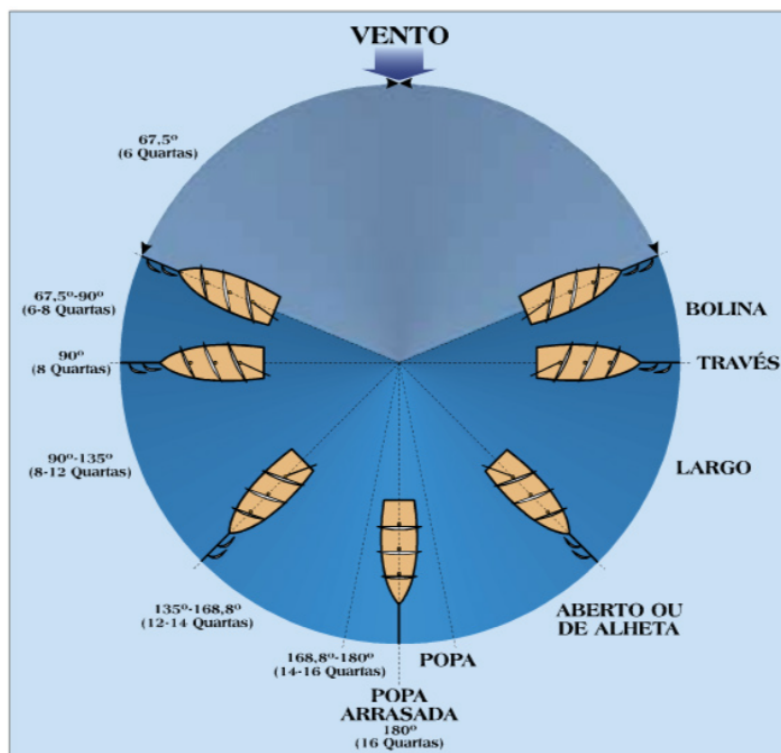


FIGURA 2.10: Mareações e limites de bolina de um navio redondo (Gonçalves, 2006).

Nesta imagem é perceptível que movimento do navio não ocorre apenas pelo efeito de arrasto, como é o caso das popas. À medida que o rumo do navio se afasta da direção do vento, isto é, no procedimento de orçar, é evidente a existência de uma força de sustentação criada pela diferença de pressões nos dois lados da vela. O movimento de aproximação da proa do navio à direção do vento denomina-se de arribar.

2.3.2 Interação entre o Vento e as Velas

Os desenvolvimentos da análise das forças aerodinâmicas é um dos problemas mais antigos do mundo da ciência e que tem vindo a sofrer consideráveis alterações, sobretudo nos dias de hoje com o melhoramento constante das capacidades computacionais. Têm surgido avanços significativos nos métodos numéricos aplicados em diferentes modelos de estudo, mas também através de simulação computacional e através de ensaios experimentais, que serão desenvolvidos com uma maior profundidade nos próximos pontos. Em 1968, Milgram aplicou pela primeira vez a técnica dos painéis no estudo aerodinâmico das velas. Charvet e Humberson, em 1992 recorreram ao método das partículas de vórtex, assumindo velas bidimensionais para bolinas onde a separação do escoamento sobre a vela foi desprezado. Mais tarde, Hedges, Richards e Mallinson, em 1996, desenvolveram um método de simulação numérica, o RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes), que tem sido até aos dias de hoje alvo de estudo, nomeadamente com comparações entre resultados de ensaios experimentais (Lasher e Flaherty, 2009).

Um conceito que é importante definir primeiramente, é a diferença entre o vento verdadeiro (WB) e o vento aparente (WA). Este último é a combinação de dois vetores: o vetor do vento verdadeiro e o vetor do escoamento do ar gerado pelo movimento do navio. Neste trabalho, referir-se-á geralmente ao vento aparente por forma a estudar o aparelho vélico em condições normais de funcionamento a navegar. O ângulo do vento aparente (AWA) representa o ângulo entre este e a proa do navio (Lasher e Flaherty, 2009).

Da interação entre o fluido e a estrutura da vela resultam forças aerodinâmicas que, quando transmitidas à plataforma, originam forças hidrodinâmicas (Lasher e Flaherty, 2009). Numa situação em que o vento se encontra para vante do través, numa bolina, a vela comporta-se como um aerofólio originando duas forças principais: força de sustentação (*lift force* - F_L), perpendicular à direção do escoamento, e força de arrasto (*drag force* - F_D), no sentido do escoamento. As forças hidrodinâmicas, que não serão aprofundadas neste trabalho, têm como referencial o próprio

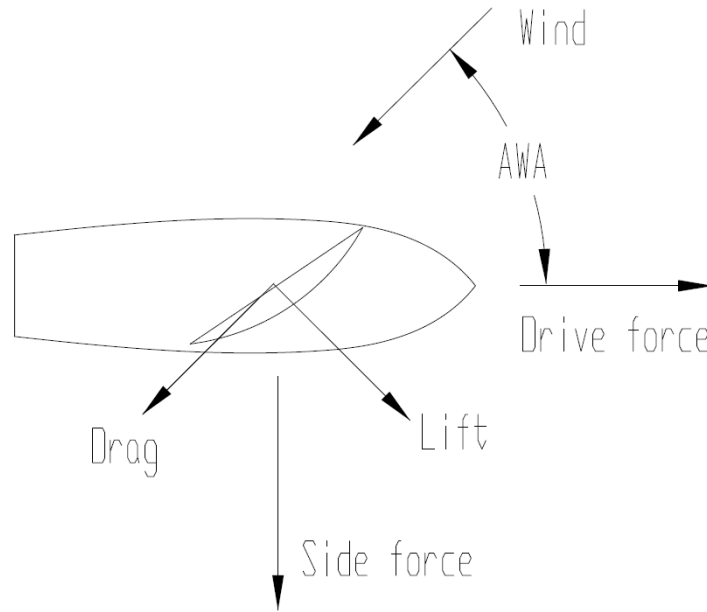


FIGURA 2.11: Forças aerodinâmicas resultantes da interação entre vento e a vela (Lasher e Flaherty, 2009).

navio. A força de impulso (*drive force*) ocorre no sentido longitudinal do navio e a uma força lateral (*side force*) perpendicular a esta. Este tipo de análise é geralmente utilizado com o objetivo de determinar a influência das cargas aerodinâmicas na estabilidade do navio e otimização de rumos em navegação à vela. Na Figura 2.11 é possível observar um esquema representativo das forças referidas. Importa mencionar, que nesta análise as forças no eixo vertical serão desprezadas. As forças F_L e F_D podem ser expressas em coeficientes adimensionais: coeficiente de sustentação (C_L , Equação 2.1) e coeficiente de arrasto (C_D , Equação 2.2), respetivamente:

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \quad (2.1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \quad (2.2)$$

Quando a direção do vento se aproxima do rumo do navio, isto é, quando entra pela popa ou pelas amuras, o fator predominante num navio redondo é a força de arrasto. O coeficiente de arrasto é composto em duas componentes: uma associada ao atrito e outra à pressão exercida pelo fluido. Neste estudo, será estudado essencialmente o coeficiente de arrasto resultante da pressão devido ao escoamento.

O coeficiente de arrasto devido ao atrito deverá ser tido em conta em velas à bolina com um comportamento idêntico a um aerofólio, onde ocorre a separação do escoamento ao longo das superfícies do objeto, por efeito da camada limite turbulenta.

A análise da interação entre as velas e o vento, em veleiros de pano redondo ao contrário dos navios com velas latinas como os de competição, encontra-se pouco desenvolvida. No entanto através da análise bibliográfica, estabeleceu-se um valor de coeficiente de arrasto de 1,2, resultando de valores tabelados para placas com relações dimensionais próximas das velas estudadas, para escoamentos com número de Reynolds superior a 10^4 . Este valor de coeficiente de arrasto é frequentemente encontrado nas Sociedades Classificadoras, como é exemplo a norma "*LR - Certification of Masts, Spars and Standing Rigging*". No trabalho desenvolvido por Lasher e Flaherty, para navios com velas redondas idênticas às do navio em questão, utilizou-se um valor de coeficiente de arrasto de 1,13, e através de simulação CFD e validação experimental é apresentado o seguinte gráfico (Figura 2.12) da variação dos coeficientes de acordo com o ângulo de ataque (White, 2016).

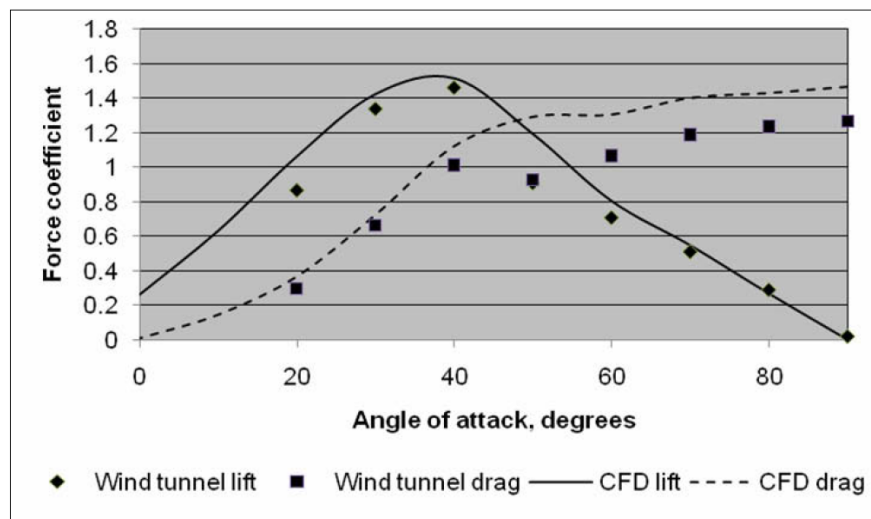


FIGURA 2.12: Variação dos coeficientes de arrasto e de sustentação para diferentes ângulos de ataque (Lasher e Flaherty, 2009).

Um facto importante em relação à situação em que a direção do vento aparente é próxima do rumo do navio, é que as flutuações da velocidade do vento e as rajadas, têm uma menor influência quando comparada com uma bolina (Viola e Flay, 2011).

2.3.3 Camada Limite na Superfície do Mar

Para o estudo de influência do vento neste tipo de navios é necessário analisar a variação da velocidade do escoamento em altura em relação à linha de água, como parâmetro de entrada para o cálculo das forças aerodinâmicas. O fenómeno da camada limite é responsável pela variação da velocidade com a altura, originada pelas forças de corte resultantes da interação entre o escoamento e a superfície, que neste caso será a água. Para este meio, pode ser expressa matematicamente pela Equação 2.3 (Lasher e Flaherty, 2009),

$$V(y) = 1.96 \cdot \ln(1000y + 1) \quad [\text{m/s}] \quad (2.3)$$

em que y representa a altura para a qual se pretende obter o valor da velocidade. Na Figura 2.13 é possível observar o perfil da velocidade resultado da camada limite, representando graficamente a equação anterior (Lasher e Flaherty, 2009).

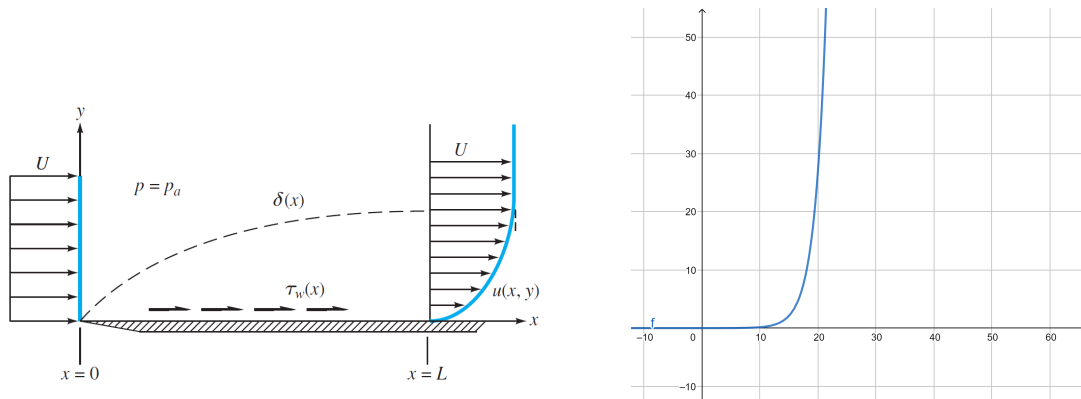


FIGURA 2.13: Representação gráfica da variação da velocidade em altura (White, 2016)

2.3.4 Simulação CFD

Para determinar as forças aerodinâmicas, são necessários dois aspetos fundamentais: a distribuição das pressões e a geometria da vela (Viola e Flay, 2011). A distribuição das pressões na vela é relativamente simples de obter através de simulação computacional, no entanto é necessário primeiramente definir uma geometria da vela. Esta é a principal problemática deste tipo de estudos que alguns autores denominam de "Interação Fluido-Estrutura"(FSI). Este facto resulta da flexibilidade

das velas que permite a alteração do seu formato com a variação das cargas aerodinâmicas (Augier et al., 2013).

Por forma a colmatar a questão anterior, o desenvolvimento tecnológico permite atualmente, através de câmaras de alta resolução, adquirir a geometria das velas e elaborar um modelo tridimensional para as simulações computacionais. Estas imagens podem ser obtidas em modelos reais ou em ensaios em túneis aerodinâmicos (Viola e Flay, 2011). Neste trabalho não será utilizada esta tecnologia.

Para proceder à simulação CFD neste estudo recorreu-se ao software *FLU-ENT*, desenvolvido pela *ANSYS*. Segundo os autores do produto, através deste software é possível obter resultados viáveis, devido a todas as validações que foi alvo. O software é bastante intuitivo e permite a introdução, ou a própria construção, de objetos fisicamente complexos.

2.3.5 Túneis Aerodinâmicos

Os túneis aerodinâmicos permitiram o desenvolvimento das técnicas de otimização na área da vela, paralelamente à evolução das técnicas de simulação CFD. No entanto, mais uma vez, grande parte dos estudos nesta área referem-se a veleiros de competição com velas triangulares, o que não intercepta completamente o foco deste estudo. Na universidade de Southampton, existe um exemplar que é utilizado desde os anos noventa para ensaios, com a particularidade de ter capacidade para induzir uma camada limite como a representada no ponto anterior. Na Universidade de Auckland, têm vindo a ser feitos ensaios que combinam a influência da camada limite da superfície do mar e o próprio movimento do navio. Estes estudos foram frequentemente utilizados com o propósito de otimizar as embarcações que competiam no *grand-prix racing yachts*. No túnel de vento da Universidade de Maryland foram feitos ensaios com correções desenvolvidas para minimizar o efeito de Blockage, que será desenvolvido neste ponto, com uma importante influência nos ensaios em velas à bolina, em que ocorre uma separação do fluido (Lasher e Flaherty, 2009).

Atualmente, a Universidade de Auckland continua a ser o principal pioneiro deste tipo de estudos experimentais. Estima-se que cerca de dois terços dos ensaios aerodinâmicos em velas sejam realizados nos seus laboratórios. Este facto deve-se ao desenvolvimento de software computacional que determina em tempo real as forças hidrodinâmicas, o Real-Time Velocity Prediction Programme (VPP), permitindo determinar a velocidade instantânea e deste modo possibilitar uma otimização mais célere. No entanto, a relação entre as forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas não foi tida em conta neste trabalho, pois o objetivo não é a otimização das velas, mas sim

o dimensionamento dos aparelhos de força, onde é necessário entrar apenas com as cargas máximas a que o sistema poderá estar sujeito.

Numa análise geral dos estudos que desenvolveram ensaios experimentais por forma a determinar as forças aerodinâmicas das velas nos diferentes âmbitos, foi possível verificar a existência de dois métodos distintos. Um dos processos, mais direto, recorre à implementação de dinamómetros nos cabos que controlam o aparelho vélico. No entanto, os novos trabalhos desenvolvem-se no sentido da medição da distribuição de pressões ao longo da vela, e a determinação dos respetivos coeficientes. Esta evolução resulta do facto de, atualmente, os ensaios experimentais terem como objetivo a validação de simulações CFD. Vários autores acreditam que a medição da distribuição de pressões e as técnicas de visualização do escoamento terão um futuro promissor (Viola e Flay, 2011).

Também a construção das velas dos modelos à escala, é diversificada nos vários estudos realizados até então. São utilizados modelos de velas rígidas que simulam a geometria da vela quando afinada para um certo ângulo de ataque, e velas flexíveis a partir do mesmo material do modelo real com uma espessura inferior. Ambos os métodos são efetivos, e apesar das velas flexíveis permitirem ajustar a vela ao escoamento, nem sempre é possível um controlo positivo da geometria da vela o que dificulta consideravelmente, em termos logísticos, a implementação de instrumentos de medição de pressão, ao contrário das velas rígidas que possibilitam uma melhor repetibilidade dos resultados (Bot et al., 2014).

Relações Importantes para Ensaios Experimentais em Túneis Aerodinâmicos

Antes da decisão sobre a escala do modelo para os ensaios experimentais, é necessário previamente acautelar algumas relações como é o caso do rácio de Blockage. No trabalho desenvolvido por Viola (2009), é referido para estudos deste âmbito que o rácio de Blockage deverá ser inferior a 10 por cento. Esta relação é obtida pela seguinte equação (Viola, 2009).

$$Blockage = \frac{S_{modelo}}{A_{tunel}} \quad (2.4)$$

Teoria da Semelhança

Para que o desempenho do modelo à escala possa ser comparado com o modelo real é essencial cumprir as leis de escala. Neste seguimento é necessário gerar parâmetros adimensionais que ajudam no projeto das experiências e processamento dos resultados experimentais. Para estabelecer um grupo adimensional é necessário compreender o processo físico, as suas leis e o conhecimento empírico na matéria por forma a determinar as variáveis importantes.

A intensidade das forças aerodinâmicas geradas entre a superfície do objeto e o fluido em escoamento dependem das seguintes variáveis:

- Velocidade do objeto (ou do escoamento no caso do objeto estar fixo na câmara de ensaios do túnel aerodinâmico);
- Densidade do fluido;
- Viscosidade do fluido;
- Compressibilidade do fluido;

No projeto de um ensaio num túnel aerodinâmico, no caso de existir uma redução de escala do modelo, é necessário preservar o rácio entre as variáveis apresentadas (Hall, 2021).

Para ensaios que implicam a medição direta das forças, é comum a utilização de um número adimensional, referido como o número de Reynolds (Equação 2.5). É uma relação entre as forças de inércia e viscosas, estando associado às perdas por atrito. Contudo, para modelos com escala reduzida é frequentemente difícil de cumprir ambos os números Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_c}{\mu} \quad (2.5)$$

em que ρ representa a densidade do fluido, V a velocidade de escoamento, D_c o tamanho característico do objeto e μ a viscosidade do fluido.

Túnel Aerodinâmico da FCT-UNL

Para o presente trabalho recorreu-se ao túnel aerodinâmico instalado no Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada, da FCT-UNL. Em termos de características físicas, é constituído por uma câmara de ensaios com uma secção transversal à entrada de 1 metro de altura por 1,5 metros de largura, com um

comprimento de 9 metros (Figura 2.14). As laterais da câmara são constituídas por várias janelas envidraçadas que permitem o acesso ao interior (de Carvalho, 1997).

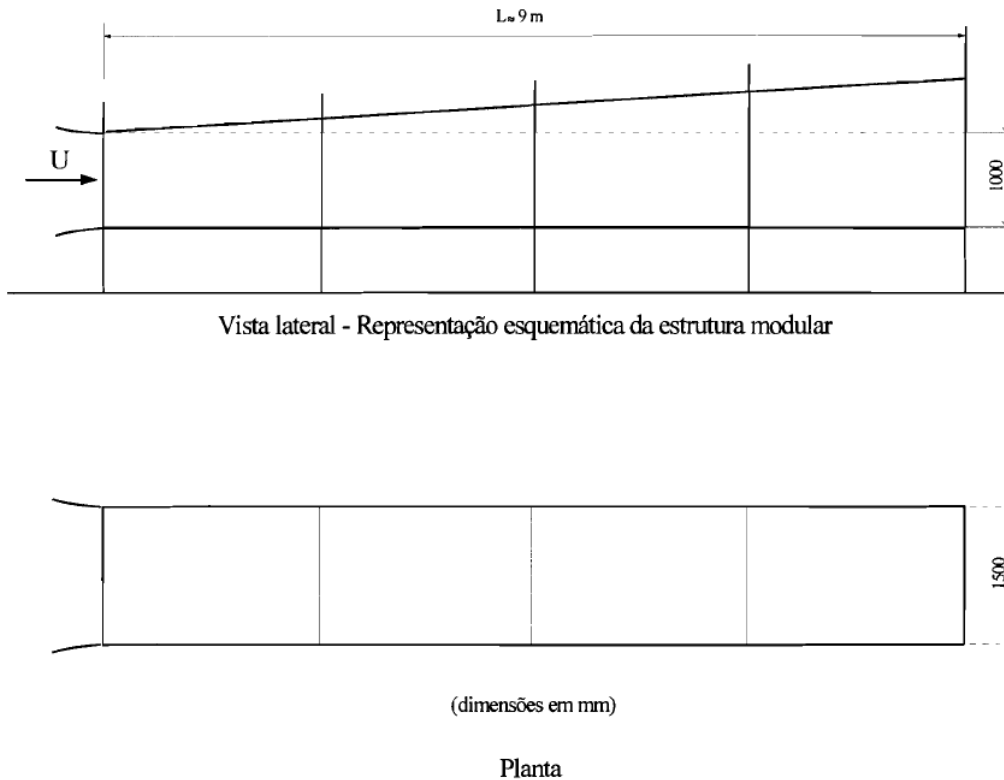


FIGURA 2.14: Câmara de ensaios do túnel aerodinâmico da FCT-UNL (de Carvalho, 1997).

É constituído por três ventiladores em paralelo num circuito fechado, acionados por motores elétricos com 15 kW de potência. Os ventiladores podem ser acionados de forma independente, dos quais dois possuem um conjunto de regimes de frequências fixos. Durante a experiência, pelas velocidades de escoamento baixas, foi utilizado um terceiro ventilador que é regulado através de um conversor de frequência, integrado no circuito elétrico de alimentação, permitindo atingir uma gama contínua de velocidades entre os 0 e os 30 m/s (de Carvalho, 1997).

A instrumentação utilizada, com o propósito de medir a velocidade no interior do túnel, foi um manómetro de Betz (Figura 2.15) que se encontrava ligado ao tubo de Pitot na entrada da câmara. Através do tubo de Pitot estático é possível obter a pressão dinâmica ($P_{dinamica}$) que resulta da subtração da pressão estática ($P_{estatica}$) à pressão total (P_{total}) (de Carvalho, 1997).

$$P_{dinamica} = P_{total} - P_{estatica} \quad [\text{Pa}] \quad (2.6)$$



FIGURA 2.15: Fotografia do manómetro de Betz utilizado nas medições (de Carvalho, 1997).

Através da pressão dinâmica ($P_{dinamica}$) é possível obter a velocidade de escoamento (V), que se relacionam pela seguinte equação:

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.7)$$

No estudo desenvolvido por Augier et al., 2013, para ensaios de um veleiro a realizar uma popa, foi considerada uma velocidade constante de 7m/s (14 kts).

2.3.6 Enquadramento Legal - Nomenclatura e Classificação

As medidas a respeitar pelo Estado Português relacionadas com as organizações responsáveis pelas inspeção, vistoria e certificação das convenções internacionais sobre a segurança marítima e prevenção da poluição marinha, encontram-se descritas pelo Decreto-Lei n.º 13/2012, de 20 de janeiro. A organizações referidas são sociedades de classificação responsáveis pela avaliação dos níveis de segurança, emitindo um certificado de classificação que comprova a adaptação estrutural e mecânica de um navio a uma determinada utilização ou serviço. Em Portugal existe um leque variado de organizações reconhecidas, das quais, pela utilidade para este trabalho, se destacam as seguintes:

- ABS (American Bureau of Shipping)
- BV (Bureau Veritas)
- DNV (Det Norske Veritas)
- LR (Lloyd's Register of Shipping)

Recorrendo às sociedades classificadoras, referidas nos pontos anteriores, foram analisadas algumas das normas que se enquadram no âmbito deste projeto, nomeadamente na área dos aparelhos vélicos, tanto para veleiros de grandes dimensões como para iates mais pequenos e frequentemente com velas triangulares, sistemas de propulsão assistida, aparelhos de força e documentação técnica geral. No Apêndice E é possível observar na Figura E.1 as normas utilizadas correspondentes a cada organização e ainda qual o contexto em que cada uma se insere.

Recorreu-se às normas referidas na Figura E.1 durante o trabalho, de formas distintas e com objetivos variados. Esta situação decorre do facto de algumas medidas apresentadas pelas organizações reconhecidas não permitirem uma aplicação direta a este trabalho. Ou seja, os conceitos retratados nas normas nem sempre são aplicáveis a este projeto, existindo a necessidade de recorrer a extrapolações. Contudo, devido ao carácter de algumas das normas ser mais qualitativo que quantitativo, não se identificaram grandes constrangimentos. De seguida, serão apresentadas algumas das diretrizes definidas pelas organizações, podendo-se observar alguns aspetos mais concretos apresentados no Apêndice E.

- DNVGL-ST-0377 - Standard for Shipboard Lifting Appliances:

Neste documento são apresentadas as regras para certificação de aparelhos de força instalados no interior e exterior de navios na situação de atracados ou a navegar. Indica as normas a seguir no âmbito do seu projeto geral, materiais, construção, instalação, testes e operação dos aparelhos de força. O principal contributo para este trabalho prende-se no dimensionamento do sistema de forças e os respetivos coeficientes de segurança.

- DNVGL-ST-0411 - Tall Ship Rigs:

Esta norma aplica-se essencialmente a veleiros de dimensões idênticas ao do N.E. “Sagres”, surgindo como uma das normas principais e que possibilitou uma aplicação mais direta. Pode ser decomposta numa parte inicial em que faz a classificação dos diferentes tipos de veleiros, chamados geralmente de *tallships*, e da nomenclatura das várias tipologias do velame. A restante norma refere-se às regras do dimensionamento do aparelho vélico. Com isto, foi possível verificar o paralelismo

entre a nomenclatura utilizada na Marinha Portuguesa e nas normas internacionais, referentes quer ao tipo de veleiro quer ao seu sistema de velas. Com recurso às regras do dimensionamento do aparelho vélico foi possível obter alguns valores de tensão admissível de determinados componentes móveis, relevantes para o capítulo da análise de forças.

- DNVGL-ST-0412 - Design and Construction of Large Modern Yacht Rigs:

Esta norma é específica para iates com velas triangulares. Define o método para calcular o centro de esforço das velas e os esforços associados ao aparelho vélico. No entanto não é muito simples de se fazer uma analogia entre este tipo de embarcações e o N.E. “Sagres”. Por outro lado, poderá ser útil para fazer uma análise das forças associadas à manobra da Mezena, no entanto a forma de funcionamento deste mastro, em que as velas envergam entre a retranca e as caranguejas, não se encontra prevista neste tipo de norma pelo que também se teria de fazer uma adaptação que poderia estar sujeita a erros.

- DNVGL-ST-0511 - Wind Assisted Propulsion Systems:

Este documento inicia-se com uma definição de quais os navios passíveis de serem classificados como WAPS (*Wind Assisted Propulsion Systems*). É feita uma análise das condições de funcionamento e dos riscos associados à operação destes equipamentos. Faz referência às regras e aos esforços associados a estes sistemas, nomeadamente em condições extremas, e os princípios de cálculo para o dimensionamento das estruturas e os respetivos critérios. Na parte final da norma é possível verificar uma relação dos documentos necessários para requerer a certificação destes sistemas.

De um modo geral, esta norma não é aplicável diretamente a este trabalho, no entanto poderá servir como uma referência para o estudo de uma forma adaptada às circunstâncias do projeto, nomeadamente a análise dos esforços e dos critérios para as tensões admissíveis;

- DNVGL-CG-0550 - Maritime Services:

A análise deste documento teve por base a compreensão dos princípios básicos e dos termos de utilização da documentação técnica e requerimentos para certificação dos sistemas. Ou seja, verificar a natureza da documentação necessária referente nas restantes normas.

- BV NR 206 DT R01 E - Wind Propulsion Systems:

Esta norma é também específica para iates com velas triangulares. Define como calcular o centro de esforço das velas e os esforços associados ao aparelho vélico. A adaptação para velas redondas não é trivial, no entanto mais uma vez poderá ser utilizada para a análise de forças em velas triangulares, apesar deste cálculo não ser o foco do trabalho aqui apresentado.

- BV NR 646 DT R00 E - Structural Assessment of Steel Ships:

Estas regras aplicam-se a navios com comprimento inferior a 90 metros, no âmbito da estrutura física e estabilidade geral do navio. Esta norma não foi aplicada diretamente, sendo analisada na sequência de referências encontradas noutras regras desta sociedade classificadora.

- BV NR 526 DT R03 E - Lifting Appliances Onboard Ships and Offshores Units:

Esta norma aplica-se no âmbito dos aparelhos de força instalados em navios na condição de atracados ou a navegar, ou em plataformas *offshore*, operadas por elementos da guarnição ou autoridades portuárias. À semelhança de outras normas já referidas, que se aplicam em matérias idênticas, a análise destas regras insere-se no dimensionamento dos aparelhos de força, seguindo os critérios previstos.

- BV NR 608 DT R00 E - Classification of Lifting Units:

Esta norma surge na sequência da anterior, sendo uma especificação para operações em mar aberto com critérios diferenciados de estabilidade para as plataformas.

- LR - Certification of Masts, Spars and Standing Rigging:

À semelhança de outras normas já referidas, as regras apresentadas neste documento aplicam-se de forma direta para iates com velas triangulares. No entanto é feita referência ao cálculo das forças de arrasto em velas redondas de acordo com o que foi referido no ponto anterior deste trabalho. Indica ainda o valor de 1,2 para o coeficiente de arrasto deste tipo de velas.

- LR - Sail Assisted Ships:

Estas regras aplicam-se a navios convencionais que naveguem em mar aberto e que possuam um sistema de propulsão que recorra à energia do vento, existindo outro meio primário de propulsão.

- LR - Lifting Appliances in a Marine Environment:

Esta norma é idêntica às normas das restantes Sociedades Classificadoras aplicáveis aos aparelhos de força instalados em navios ou plataformas *offshore* e a sua análise surge como complemento ao cálculo do dimensionamento destes aparelhos no trabalho aqui apresentado.

- ABS - Wind Assisted Propulsion Systems Installation:

Estas regras aplicam-se novamente a navios que possuam um sistema de propulsão auxiliar com recurso à energia do vento, no entanto não substituindo um sistema de propulsão convencional. Na sua análise é possível verificar as diversas regras para sistemas que recorrem a rotores e aparelho vélicos rígidos e flexíveis.

- ABS - Certification of Lifting Appliances:

Este documento foi analisado como complemento às restantes normas referentes aos critérios de dimensionamento, instalação, teste e operação de aparelhos de força.

Avaliação de riscos

Todos os aspetos de projeto, instalação e operação dos sistemas devem seguir uma avaliação de riscos, incluindo os seguintes aspetos:

- Condições atmosféricas adversas;
- Velocidade excessiva;
- Vibrações;
- Falha do sistema de controlo;
- Falha de componentes;
- Incêndios;
- Sobrecarga;
- Eletricidade estática;
- Falha humana.

Gamas de Operação

Da análise das normas apresentadas anteriormente, retira-se que existem duas condições de funcionamento que é necessário ter em conta: condições normais de funcionamento e condições extremas.

- Condições Normais de Funcionamento:

Durante a operação normal do equipamento, as únicas cargas a ter em conta são a ação do vento e a inércia do próprio aparelho. Ou seja, o cálculo dos esforços é obtido através da determinação da força resultante do vento.

No enquadramento teórico foi apresentada a equação que representa a variação da velocidade do vento, considerando a camada limite sobre a superfície do mar. Através da Equação 2.3 e entrando com uma altura de 20 metros como aproximação do centro de área, obtém uma velocidade do vento de 19,4 m/s.

A norma "DNVGL-ST-0412" refere a utilização de uma velocidade de vento de projeto de 19 m/s.

- Condições Extremas de Funcionamento:

Nas normas apresentadas, as condições extremas que poderão afetar a manobra do aparelho são: o vento extremo, gelo ou neve, temperaturas extremas e o estado do mar alterado.

Em relação ao vento extremo a norma DNVGL-ST-0412 refere a utilização de uma velocidade superior a 50 m/s tendo em conta as características físicas do navio. De referir que esta norma se aplica diretamente a navios em que o recurso ao vento constitui uma forma de propulsão auxiliar, em que grande parte das instalações terão de permanecer expostas a estas condições atmosféricas, apesar de não se encontrarem em funcionamento. No entanto, naturalmente que num navio como o N. E. "Sagres", não estará previsto largar pano em tais situações.

A gama de temperaturas definida para equipamentos operados no exterior do navio é dos $-15^{\circ}C$ aos $45^{\circ}C$. Em relação à acumulação de gelo, é sugerido considerar uma espessura de 3 cm, calculando a massa adicional com uma densidade de 700 kg/m^3 .

Para as diferentes condições de funcionamento apresentadas, as restantes Sociedades Classificadoras corroboram os valores referidos.

2.4 Síntese - Anteprojeto

A definição do problema, aqui apresentada, termina numa sintetização de ideias e conceitos, culminando no projeto preliminar que de um modo geral cumpre os requisitos definidos.

Este projeto surge no âmbito da necessidade de reinventar a navegação à vela no N. E. “Sagres”, com base nos três pilares principais definidos, tornando-o mais eficiente, seguro e tecnologicamente desenvolvido. Ou seja, gerar capacidades a este navio, que conta com mais de meio século ao serviço da Marinha Portuguesa, de modo a tornar a sua navegação mais atrativa nos diversos âmbitos, mantendo a tradição e a cultura associada a este tipo de navios viva, perdurando através das novas gerações.

Uma das soluções possíveis, que é desenvolvida neste trabalho, é a instalação de aparelhos de força com o objetivo de mecanizar as manobras do velame. O embarque no N.E. “Sagres” permitiu adquirir o conhecimento técnico e empírico do funcionamento do aparelho vélico. Um dos objetivos do embarque, foi a avaliação da possibilidade de mecanizar todas as manobras ou instalar um equipamento mais versátil com polivalência suficiente para colmatar várias necessidades.

As manobras do aparelho, como se referiu anteriormente, podem ser divididas em dois grupos diferentes, em que as operações associadas à manobra dos mastros e das vergas implicam um maior esforço físico por parte dos elementos da guarnição, quando comparadas com a afinação do pano. Este facto, levou à decisão de instalar aparelhos para auxiliar duas das manobras principais e mais exigentes a nível de recursos humanos: içar as vergas através das ostagas e bracear as vergas das velas dos mastros redondos.

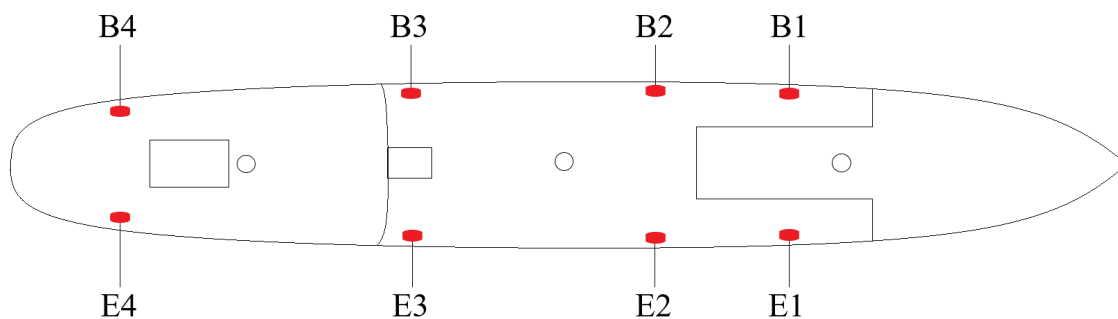


FIGURA 2.16: Diagrama da localização dos aparelhos de força.

Na Figura 2.16 é apresentada uma proposta para a localização dos aparelhos de força em quatro zonas de cada bordo com o objetivo de auxiliar mecanicamente as manobras anteriormente referidas. A quantidade de aparelhos sugeridos é resultado de uma importante reflexão sobre as necessidades apresentadas e um balanço entre a facilidade de instalação e o mínimo de alterações físicas à plataforma.

Por forma a facilitar a sua identificação, estes aparelhos foram definidos com códigos em que a letra corresponde ao bordo e o número indica a sua localização longitudinal, em que quanto menor for o algarismo, mais a vante se encontra. Os dois cabrestantes mais a vante junto das escadas para o castelo de proa (B1 e E1), encontram-se junto das ostagas do Traquete. No poço, numa posição mais a vante (B2 e E2) localizam-se os braços do Traquete, e junto das escadas para o tombadilho a ré (B3 e E3), encontram-se as ostagas do Grande. Os cabrestantes mais a ré (B4 e E4), estão colocados junto dos braços do Grande.

No Apêndice F, é possível verificar quais as manobras possíveis de realizar com cada aparelho como se sugere no diagrama da Figura 2.16. No entanto, para desenvolver a análise dos esforços e consequente dimensionamento dos aparelhos, é necessário definir as manobras determinantes para cada aparelho e assim calcular a potência mínima necessária. Na Tabela 2.4, é possível verificar as manobras referidas correspondentes a cada aparelho, assim como o cabo associado à operação.

TABELA 2.4: Manobras determinantes para cada aparelho de força

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Código Cabo
B1	Ostaga Velacho Alto	T53
E1	Ostaga do Joanete de Proa	T54
B2 / E2	Braços do Traquete	T58 a T63
B3	Ostaga do Joanete	B69
E3	Ostaga da Gávea Alta	B58
B4 / E4	Braços do Grande	M34 a 39

De referir que os aparelhos a instalar no local dos braços dos mastros redondos, têm como objeto as vergas correspondentes aos papafigos que exigem maior esforço físico, comparado com as restantes. No entanto, pelas características da sua manobra, em que a operação das três vergas inferiores (papafigos, gáveas baixas e gáveas altas) deverá ser realizada em simultâneo, sugere-se a implementação de um sistema que permita esta ação.

Requisitos do Projeto

Um projeto, como o estudo que é apresentado, necessita de responder a uma situação concreta de uma forma adequada, exequível e aceitável. Os requisitos iniciais adotados têm por base as regras definidas pelas Sociedades Classificadoras referentes à generalidade do funcionamento dos aparelhos vélidos. Os valores resultantes desta análise sugerem uma gama de operações que deverá ser analisada no cálculo de esforços. Estas regras enquadram-se na aceitabilidade do projeto, cumprindo com as normas internacionais.

TABELA 2.5: Requisitos para a gama de funcionamento do aparelho vélido

Gama de Funcionamento do Aparelho Vélido		
Condições Normais	Velocidade do Vento de Projeto	20 m/s
Condições Extremas	Velocidade do vento Extremo	50 m/s
	Temperaturas Extremas	-15°C a 45°C
	Acumulação de Gelo e Neve	3 cm (700 kg/m ³)

As medidas tomadas por forma a adaptar o projeto às necessidades identificadas, e de um modo exequível, serão apresentadas no dimensionamento do sistema, onde serão referidas as regras que normalizam a operação dos aparelhos de força.

2.5 Metodologia de Investigação

Espiral do Projeto de Harvey Evans (1959)

O projeto é um procedimento iterativo que implica inicialmente assumir alguns pressupostos e através de várias análises consecutivas, com várias iterações, terminar com um resultado que satisfaça os requisitos definidos. Ou seja, deliberar e tomar decisões progressivamente mais sustentadas, criando alternativas a ajustar à medida que surge mais informação. Este processo poderá ser metaforicamente representado como uma espiral (Figura 2.17), conhecida como a "Espirale do Projeto de Harvey Evans" onde cada análise representa uma rotação que termina mais próxima do centro, correspondendo ao resultado pretendido (Larsson et al., 2022).

É evidente que a espiral poderá ter um número de rotações infinitas, que poderão implicar processos morosos e dispendiosos. Para colmatar esta questão, o responsável pelo projeto terá de recorrer ao seu espírito crítico de modo a definir limites e margens de trabalho. Por outro lado, atualmente a engenharia encontra-se

munida de inúmeras ferramentas que auxiliam este processo e simplificam algumas etapas. Nesta matéria os *softwares* de simulação, programação e cálculo são essenciais para, de uma forma expedita, avaliar cada fase do projeto, sem a necessidade de elaborar modelos físicos e complexos. O principal fator decisivo é o valor de precisão necessária para o projeto e definida pelo seu autor ou cliente.

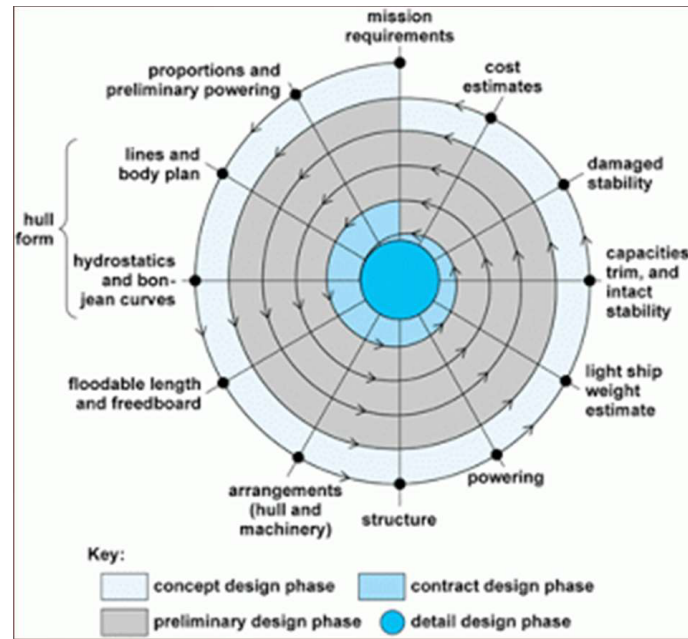


FIGURA 2.17: Espiral do Projeto de Harvey Evans (1959) (Larsson et al., 2022).

Metodologia Adotada

Este trabalho surge no âmbito da necessidade, identificada e apresentada no primeiro capítulo, de reinventar o conceito da navegação à vela no N. E. “Sagres”.

A fase seguinte teve como intuito concretizar a questão por desenvolver, ou seja, a definição do problema. Neste ponto do trabalho pretendeu-se recolher todas as especificações e dados relevantes do objeto a projetar. Neste caso específico, abrange a recolha de dados do funcionamento do aparelho vélico do navio e toda a formulação teórica necessária para abordar a problemática. Isto é, compreender os fenômenos físicos aplicados ao problema, efetuar uma revisão das normas extensíveis à questão levantada e reunir as ferramentas passíveis de utilização por forma a atingir os objetivos.

Esta etapa culmina numa síntese, que de um modo concreto, neste trabalho é apresentada como o anteprojeto que tem por propósito a "invenção do conceito". Como foi referido anteriormente, trata-se de um processo iterativo, pelo que a síntese

resulta de inúmeras decisões em que alguns dos conceitos na fase de análise poderão ser revistos, alterados ou mesmo eliminados.

A análise deste projeto foi dividida em duas etapas distintas, em que numa fase inicial é efetuado o cálculo de esforços como dado de entrada para o dimensionamento dos aparelhos de força e das restantes questões relacionadas com a sua instalação e tempo de vida útil do objeto.

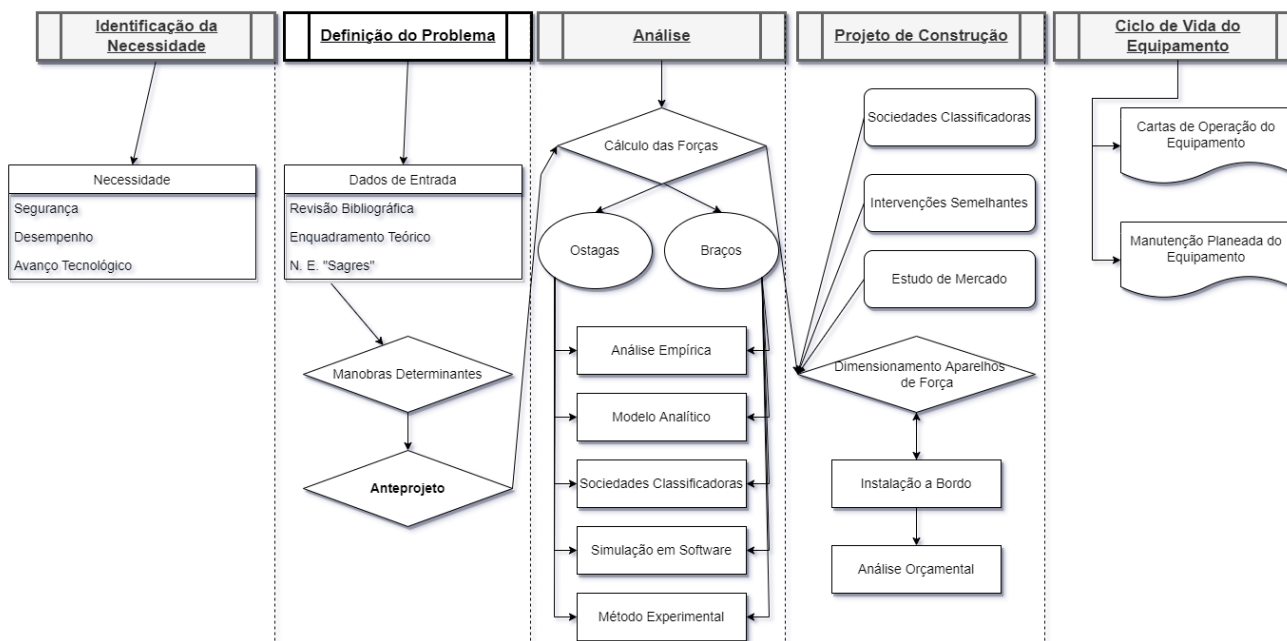


FIGURA 2.18: Metodologia de investigação adotada.

Capítulo 3

Análise

Partindo dos requisitos apresentados no anteprojeto e seguindo as linhas de ação definidas na metodologia de investigação adotada, segue-se a análise do cálculo de forças por forma a obter os dados necessários para o dimensionamento dos aparelhos de força.

Relembrando as características dos aparelhos de força, as operações que se pretende mecanizar são divididas em dois grandes grupos: içar as vergas dos mastros redondos através das ostagas e bracear as vergas destes mesmos mastros através dos braços. Esta separação de manobras é fundamental por forma a compreender as diferenças no cálculo das forças associadas a cada uma.

Para além da determinação dos valores das forças para as duas operações diferentes do aparelho vélico, foram definidas condições de fronteira por forma a garantir a verificação das gamas de funcionamento definidas para o projeto, previstas pelas sociedades classificadoras. Ou seja, a análise do esforço aplicado foi efetuada para condições normais de funcionamento e em condições extremas, resultantes do vento intenso e existência de gelo/neve. Para uma melhor definição das condições de fronteira referidas, dividiram-se as forças na componente gravitacional ou inercial e aerodinâmica.

Foram definidos vários modelos e métodos com o propósito de obter estes valores e verificar alguns pressupostos assumidos *a priori*. Iniciou-se com uma análise ao modelo real, ao qual, através do conhecimento empírico se associou o número de elementos da guarnição necessários para cada operação e uma força daí resultante. Por outro lado, partindo das características do próprio aparelho, obteve-se um valor da força admissível através da tensão de rutura dos cabos utilizados nas diferentes manobras.

O cálculo analítico foi aplicado de forma bastante diferenciada para cada operação do velame. A fim de determinar a força necessária para içar as vergas, calculou-se peso da verga. Para a determinação deste valor na ação de bracear foi inicialmente calculado a força de atrito do equipamento sem a influência da força do vento.

Por forma a determinar as forças aerodinâmicas é necessário obter a força de arrasto e o respetivo momento resultante na verga, o qual é limitado pelos braços. Esta força resultante do vento, foi determinada analiticamente, assumindo um coeficiente de arrasto para a vela, e através de simulação CFD. Obtendo este valor, calculou-se a força transferida para a verga e, por consequência, as forças nos braços que controlam a sua posição. O cálculo das forças aerodinâmicas nas velas, implica conhecer dois aspetos distintos: a geometria da vela e a distribuição de pressões. Não tendo estas informações inicialmente, foi necessário assumir determinados pressupostos. Por forma a validar esta situação, comparou-se o cálculo analítico com os valores obtidos na simulação CFD, e ainda se procedeu a um ensaio experimental num túnel aerodinâmico. Na Figura 3.1, é possível verificar a combinação destes modelos.

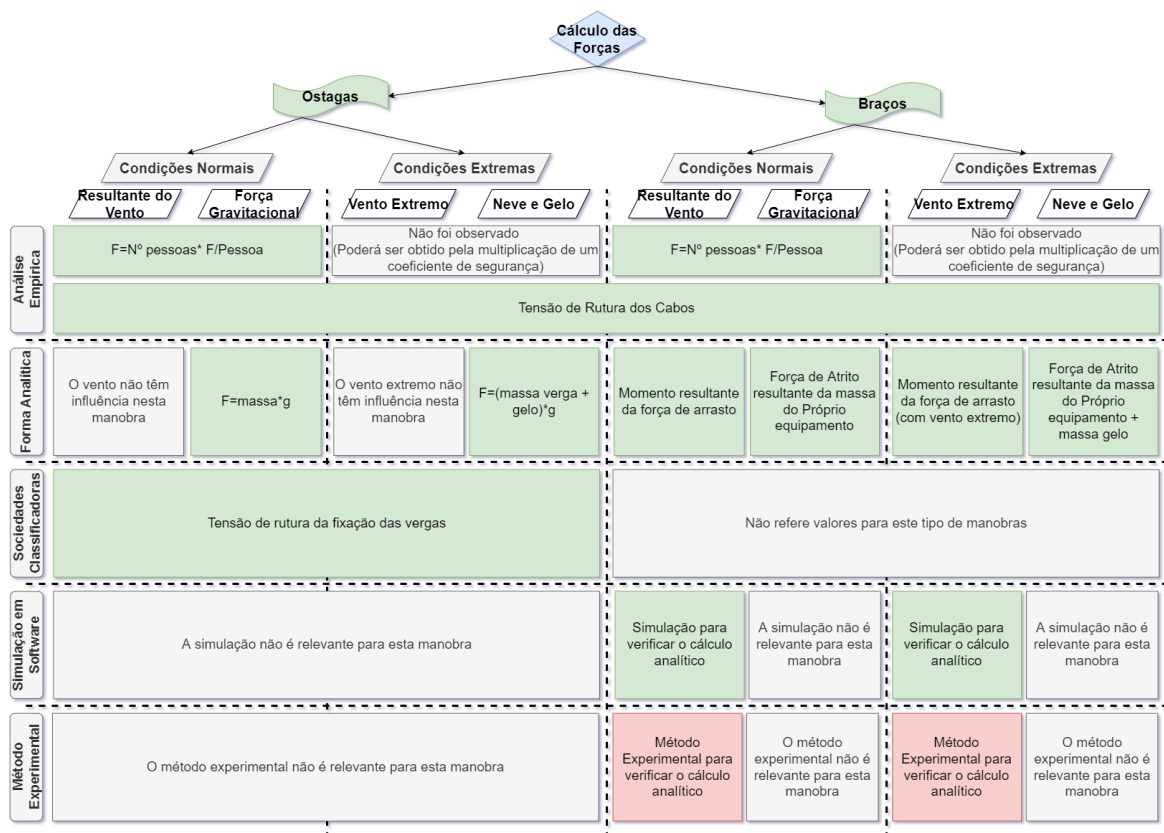


FIGURA 3.1: Diagrama da análise de forças.

3.1 Análise Empírica

Analizando vários trabalhos efetuados na área da determinação de forças no aparelho vélico é possível verificar que existe algum desenvolvimento de métodos numéricos, simulação computacional e métodos experimentais em modelos à escala, principalmente para veleiros com velas triangulares que são normalmente utilizadas em competição. No entanto, poucos autores abordam esta análise em modelos reais, pela sua complexidade. A forma mais comum de obter as forças aplicadas ao aparelho vélico durante o seu funcionamento é a aplicação de dinamómetros nos vários cabos que indicam a força aplicada aos mesmos. Esta técnica é utilizada com frequência na obtenção das tensões nos cabos fixos do aparelho, como os estais e os brandais. Outro método a que se recorre com o mesmo propósito, é a colocação de sensores de pressão nas velas por forma a obter a distribuição das pressões ao longo da mesma e os respetivos coeficientes de pressão. Deste modo, aplica-se a força resultante da ação do vento no centro de pressão e calcula-se a componente que é transferida para os cabos.

Neste trabalho, por dificuldades logísticas, não foi exequível a medição da tensão nos cabos de forma direta através de dinamómetros. Porém, através das observações efetuadas durante o funcionamento e operação do aparelho, foi recolhida alguma informação passível de ser utilizada de uma forma direta ou indireta para o dimensionamento dos aparelhos.

3.1.1 Força Resultante do Número de Elementos Necessários por cada Manobra

Uma destas informações é a quantidade de elementos necessários para as manobras determinantes, citadas anteriormente. Tendo o número de pessoas necessárias e uma aproximação à força exercida por cada pessoa é possível obter a força total necessária nas condições observadas. De referir que as observações efetuadas ocorreram nas condições normais de funcionamento em que a velocidade do vento aparente era inferior a 20 nós (10.3 m/s). Para este efeito, é necessário compreender qual a força que um operador consegue realizar em determinadas circunstâncias.

A força que um ser humano tem capacidade de exercer é dependente de diversas variáveis como a sua idade, género, a posição do tronco, o ângulo e a direção sobre a qual a força é aplicada. Para além destes fatores é necessário aplicar alguns coeficientes por forma a acautelar questões relacionadas com a fadiga. De um modo geral, é indicado que a força que o operador poderá exercer de uma forma

contínua corresponde a um terço da sua força máxima. No estudo desenvolvido por B. Das e Y. Wang através de métodos experimentais, estabeleceu-se que a força média contínua do operador (um terço da sua força máxima) é 148 N (Das e Wang, 2004).

No mesmo trabalho é possível obter os valores experimentais para posições do corpo específicas. Considerando um elemento do género masculino em pé, com os braços paralelos ao tronco e com o braço e antebraço perpendiculares, na ação de puxar, é definida uma força média de 127 N. Na Figura 3.2 é apresentado um exemplo em que os elementos da guarnição estão colocados em posição para a manobra dos braços do mastro do Traquete. Para além deste trabalho, foi analisado outro estudo que para a mesma posição, refere o valor de 148 N.

Para este trabalho, considerou-se um valor médio entre estes dois estudos, multiplicado por um coeficiente de segurança de 1,2, com o objetivo de colmatar algumas situações de aplicações mais diretas, onde o esforço poderá atingir um pico instantâneo e deste modo garantir uma margem de trabalho para o estabelecimento dos valores das forças aplicadas. Para além deste fator, este coeficiente garante igualmente uma margem para as manobras em que o cabo é tracionado através do movimento constante dos operadores. Posto isto, foi definido um valor de 165 N, como a capacidade média por indivíduo, nas condições referidas.



FIGURA 3.2: Posição dos elementos na manobra de bracear.

Durante as observações da operação do aparelho vélico registou-se que seria necessário um total de até 15 elementos para a manobra dos braços e das ostagas dos joanetes e dos sobres. Por forma a içar as vergas das gáveas altas é necessário aumentar o número de operadores que poderá chegar a um total de 25 elementos.

TABELA 3.1: Cálculo da força correspondente a cada manobra

Manobra	Nº Pessoas	Força Desmult. [N]	Desmul.	Força Total [N]
Ostagas dos Gáveas Altas	25	4128,60	6	24771,60
Ostagas dos Joanetes	15	2477,16	5	12385,80
Ostagas dos Sobres	15	2477,16	4	9908,64
Braços (Gáveas, Velachos e Papafigos)	15	2477,16	2	4954,32
Braços dos Joanetes	15	2477,16	2	4954,32
Braços dos Sobres	15	2477,16	2	4954,32

Na Tabela 3.1 encontram-se os valores obtidos para as forças aplicadas em cada manobra. Ainda é possível verificar, tendo em conta a desmultiplicação de cada cabo, qual é a força total aplicada na verga, multiplicada pelo coeficiente correspondente. No entanto, por forma a comparar os resultados obtidos nos diferentes modelos de forma coerente, serão sempre referidas como forças aplicadas, os valores com a desmultiplicação, ou seja, a força necessária aplicar nos cabos quando operados pelos elementos da guarnição.

Em suma, associando cada manobra ao aparelho correspondente, obtém-se o dimensionamento da capacidade necessária tendo em conta o cálculo empírico apresentado (Tabela 3.2).

Estes valores correspondem a uma operação normal do sistema. Tendo em conta que durante o período do embarque não foi possível obter registos do funcionamento do aparelho vélico nas condições definidas como extremas, como vento extremo, neve ou gelo, esta situação será estudada analiticamente nos próximos pontos apresentados.

TABELA 3.2: Dimensionamento dos aparelhos de força através da força resultante do número de pessoas associado a cada manobra

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B1	Ostaga Velacho Alto	4128,60
E1	Ostaga do Joanete de Proa	2477,16
B2 / E2	Braços do Traquete	2477,16
B3	Ostaga do Joanete	2477,16
E3	Ostaga da Gávea Alta	4128,60
B4 / E4	Braços do Grande	2477,16

3.1.2 Tensão de Rutura dos Cabos

Para além do número de pessoas associadas a cada manobra, foi também recolhida informação acerca da bitola e do material dos cabos. Considerando que os cabos foram dimensionados com capacidade para resistir à tensão máxima do equipamento vélico, a tensão de rutura dos mesmos, à parte de um fator de segurança, indicará a tensão máxima que se prevê que os cabos poderão estar sujeitos.

O material em questão é *AstraLine*, tratando-se do nome comercial deste produto, que é usado com frequência no ramo marítimo pelas suas características de utilização em ambiente húmido. Na Figura 3.3 é possível observar a tensão de rutura de cabos deste material com vários diâmetros de bitola. Em que MBF, corresponde à força mínima de rutura do cabo.

Como é possível verificar no Apêndice D, os cabos utilizados nas manobras referidas como determinantes para os aparelhos em estudo possuem uma bitola de 26 mm. Entrando na tabela da Figura 3.3, retira-se um valor de tensão de rutura de 133 kN.

O valor referido corresponde à tensão de rutura do cabo, no entanto este número é resultado da aplicação de fatores de segurança. As normas das Sociedades Classificadoras referidas anteriormente, indicam que em aparelhos de força operados por pessoas e cujos objetos móveis se encontram suspensos na vertical, deverá ser aplicado um fator de segurança superior a 7. Ou seja, reduzindo o valor da tensão de rutura pelo coeficiente de segurança, obtém-se um valor de tensão nos cabos na ordem dos 19 kN.

O valor da tensão obtida terá de ser relacionado com os resultados das forças com a desmultiplicação correspondente, sabendo que na realidade o aparelho não

3 Strand Astra® Line ropes				
Size Nr.	Diameter mm	Weight kg/100m	MBF kN	MBF Tonf
0,75	6	2	7,2	0,73
1	8	3,8	13,5	1,38
1,25	10	5,5	20	2,04
1,5	12	8	28,8	2,94
1,75	14	10,9	39,4	4,02
2	16	14,1	51	5,2
2,25	18	17,8	64,7	6,6
2,5	20	22,1	79,4	8,1
2,75	22	26,8	96,1	9,8
3	24	31,9	116	11,8
3,25	26	37,6	133	13,6
3,5	28	43,4	152	15,5
3,75	30	49,9	172	17,5
4	32	56,5	192	19,6
4,5	36	71,4	239	24,4
5	40	88,4	288	29,4
5,5	44	108	344	35,1
6	48	127	404	41,2
6,5	52	150	470	47,9
7	56	172	538	54,9
7,5	60	197	610	62,2
8	64	224	699	71,3

FIGURA 3.3: Tensão de rutura dos cabos em *AstraLine* (Oliveira Sá, 2019).

estará sujeito à totalidade estas tensões. Entrando com o fator de desmultiplicação obtém o seguinte dimensionamento para os aparelhos de força referidos (Tabela 3.3).

É possível verificar que os valores para algumas das manobras se encontram próximos do resultado obtido através do número de pessoas associado a cada manobra. Para outras operações, como por exemplo os braços dos mastros redondos, o valor obtido através das tensões de rutura é consideravelmente mais elevado. Este facto sugere um sobredimensionamento dos cabos, que dentro de várias razões plausíveis, poderá ser justificado por motivos ergométricos, facilitando o seu manuseamento. Para além desta informação, podemos concluir destes valores que as tensões de rutura dos cabos não serão determinantes para a limitação da capacidade motora dos equipamentos que serão desenvolvidos durante este trabalho.

De referir que os valores apresentados inserem-se em qualquer condição de funcionamento do aparelho, incluindo nas condições extremas.

TABELA 3.3: Dimensionamento dos aparelhos de força através da tensão de rutura dos cabos

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B1	Ostaga Velacho Alto	3166,67
E1	Ostaga do Joanete de Proa	3800,00
B2 / E2	Braços do Traquete	9500,00
B3	Ostaga do Joanete	3800,00
E3	Ostaga da Gávea Alta	3166,67
B4 / E4	Braços do Grande	9500,00

3.2 Recurso às Sociedades Classificadoras

3.2.1 Tensões de Rutura dos Equipamentos

Como foi referido na análise das regras definidas pelas Sociedades Classificadoras, existem normas que referem valores de tensões admissíveis para as componentes do aparelho vélico. Na norma "DNVGL-ST-0411 Tall Ship Rigs", é possível verificar várias tabelas em anexo que referem o dimensionamento apropriado às várias características físicas do navio. Entrando com os valores dimensionais do N. E. "Sagres", obtém entre vários aspetos, os valores de tensão admissíveis dos suportes das vergas que sugerem uma referência dos valores máximos de força a que poderão estar sujeitas as ostagas.

TABELA 3.4: Tensões admissíveis no suporte das vergas aos mastros

Cargas Admissíveis no Suporte das Vergas ao Mastro		
Vergas Fixas (yard sling)	Papafigos	65,8 kN
	Gáveas Baixas	55,7 kN
Velas de Içar (tie)	Gáveas Altas	38 kN
	Joanetes	25,2 kN
	Sobres	13,1 kN

Os valores obtidos, representados na Tabela 3.4, resultam de cálculos efetuados pela Sociedade Classificadora tendo em conta o dimensionamento das vergas e a sua massa resultante. Pelo que estes valores são de cariz meramente indicativo,

tendo em consideração que não resultam do próprio dimensionamento do aparelho instalado no navio.

Traduzindo estes valores para as diferentes manobras das vergas e, consequentemente, para os aparelhos de força projetados para operar com estas vergas obtém-se os seguintes valores de forças (Tabela 3.5), tendo em conta a desmultiplicação já referida.

TABELA 3.5: Dimensionamento dos aparelhos de força através das tensões admissíveis definidas pelas Sociedades Classificadoras

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B1	Ostaga Velacho Alto	6333,33
E1	Ostaga do Joanete de Proa	5040,00
B3	Ostaga do Joanete	5040,00
E3	Ostaga da Gávea Alta	6333,33

Os valores aqui apresentados, segundo as Sociedades Classificadoras, abrangem todas as condições de funcionamento, incluindo as cargas extremas como o vento e o gelo.

3.2.2 Forças Transferidas aos Cabos

Na norma DNVGL-ST-0412 - Design and Construction of large modern Yatch Rigs é apresentada uma aproximação da força resultante do vento nas escotas de uma retranca da vela grande (latina) de um veleiro tradicional com velas triangulares. Apesar de não coincidir exatamente com a questão em estudo, é possível efetuar uma analogia entre esta força e as forças correspondentes aos braços da vergas (Figura 3.4). De um modo prático, as vergas que são controladas pelos braços que podem ser compradas com retranscas, caçadas através de escotas.

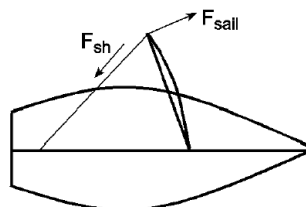


FIGURA 3.4: Diagrama força resultante do vento (DNV-GL, 2016a).

É referida uma igualdade entre a componente horizontal da carga aplicada à vela (F_{sail}) e a força necessária ao cabo que a controla (F_{sh}).

$$F_{sh} \approx F_{sail} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \approx 75 \cdot S \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

Pela aplicação direta da equação 3.1 e entrada com a desmultiplicação do aparelho correspondente obtém-se os valores apresentados na tabela seguinte (Tabela 3.6).

TABELA 3.6: Força Aplicada aos cabos devido às cargas aerodinâmicas na vela

Braços	Força Aplicada aos Cabos [N]
Papafigos	7665,0
Gáveas Baixas	3832,5
Gáveas Altas	4023,8

Deste modo, obtém se o seguinte dimensionamento para os braços dos mastros redondos (Tabela 3.7).

TABELA 3.7: Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através das normas das Sociedades Classificadoras

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B2 / E2	Braços do Traquete	7665,00
B4 / E4	Braços do Grande	7665,00

Novamente estes valores inserem-se nas diferentes condições de funcionamento do aparelho. O sobredimensionamento obtido em relação aos restantes métodos, poderá ter justificação no facto de incluírem uma gama alargada de funcionamento. Por outro lado, nesta norma são referidos alguns coeficientes correspondentes à transferência das cargas aerodinâmicas pelos diferentes cabos de afinação das velas. A aplicação destes fatores, diminui a componente total da força até cinquenta por cento, no entanto, não é possível uma aplicação direta destes coeficientes para a tipologia de velas em estudo.

3.3 Modelo Analítico

Assumindo alguns pressupostos iniciais foi possível criar um modelo analítico para o cálculo das forças do aparelho vélico. Como foi referido, as cargas a que o sistema se encontra sujeito podem ser integradas em duas situações distintas, condições normais de funcionamento e condições extremas.

Dentro dos diferentes paradigmas de operação do equipamento existem cargas específicas aplicadas. Nas condições normais de funcionamento é feito o cálculo das forças gravitacionais e resultantes do vento de projeto. Nas condições extremas tiveram-se em conta as cargas associadas ao vento extremo e à acumulação de gelo e neve. De referir ainda que o cálculo foi realizado de forma diferenciada para cada manobra do aparelho que se pretende estudar.

Neste seguimento, este ponto encontra-se organizado em duas componentes: forças gravitacionais, que em condições normais de funcionamento apenas se aplica a própria massa do sistema e em condições extremas é adicionado a massa da acumulação de gelo, e forças aerodinâmicas resultantes da ação do vento de projeto e do vento extremo.

3.3.1 Forças Gravitacionais

As forças gravitacionais, resultam da massa do próprio sistema ou da adição de massa pela acumulação de gelo e neve.

Forças Referentes às Ostagas

Assumindo que as vergas se encontram suspensas nas ostagas durante o período em que são içadas, negligenciando o atrito do sistema e as acelerações provocadas pelo movimento do navio, a carga aplicada na manobra de içar as vergas corresponde à força normal resultante da massa da verga.

Deste modo, foi necessário calcular a massa de cada verga de içar. Para este efeito, utilizando os dados do Apêndice C, através das propriedades do material que constituí as velas, a área velica e a espessura, obtendo-se um valor aproximado da massa do pano que foi adicionada à massa da própria verga (Massa Teórica, Tabela 3.8). O valor resultante da soma da massa do pano e da verga, multiplicou-se por coeficiente de segurança por forma a colmatar os aspetos negligenciados, como por exemplo os acessórios colocados na vela (Massa Considerada, Tabela 3.8).

TABELA 3.8: Massa Considerada para cada Vela

Massa Considerada para cada Vela				
Vela	M. Pano [kg]	M. Verga	M. Teórica [kg]	M. Considerada [kg]
Gáveas Altas	441,00	1598	2039,00	2100
Joantes	413,88	771	1184,88	1250
Sobres	270,85	401	671,85	750

Através da fórmula da força normal (Equação 3.2), a carga exercida por cada verga (F_{verga}) obtém-se da multiplicação da respetiva massa (m_{verga}) pela aceleração gravítica.

$$F_{verga} = m_{vela+verga} \cdot g \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

O resultado obtido pela equação anterior, é referente à força total que a verga exerce sobre o aparelho. No entanto, para obter o valor da carga transferida aos cabos acionados pelos operadores, terá que se entrar com a desmultiplicação.

TABELA 3.9: Força aplicada a cada verga de içar

Manobra	Código Cabo	Força Total [N]	Desmul.	Força Desmult. [N]
Gáveas Altas	T53 e B58	20580	6	3430
Joanetes	T55 e B69	12250	5	2450
Sobres	T54 e B64	7350	4	1838

Ou seja, para condições normais de funcionamento, obtém-se os seguintes valores de força mínima necessária para cada aparelho de força exclusivos para à manobra das ostagas (Tabela 3.10).

TABELA 3.10: Dimensionamento dos aparelhos de força (ostagas) através do cálculo analítico em condições normais de funcionamento

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B1	Ostaga Velacho Alto	3430
E1	Ostaga do Joanete de Proa	2450
B3	Ostaga do Joanete	2450
E3	Ostaga da Gávea Alta	3430

Em condições extremas, à força normal calculada para cada verga é necessário adicionar a massa do gelo e da neve acumulada. Neste caso, apenas foi considerado o gelo por ser determinante, tendo em conta que a sua densidade é superior à neve. No seguimento das regras definidas pelas Sociedades Classificadoras, foi considerada uma espessura de 3 cm de gelo sobre a área projetada de cada verga e adicionada à massa apresentada na Tabela 3.8. Atualizando estes valores obteve-se uma nova massa a considerar para o cálculo da força normal (Tabela 3.11).

TABELA 3.11: Massa considerada para cada vela com a adição da acumulação da massa de gelo

Massa considerada para cada Vela com a adição da acumulação da massa de gelo				
Vela	M. Normal [kg]	Volume Gelo [m ³]	M. Gelo [kg]	M. Considerada [kg]
Gáveas Altas	2100	0,18	127,01	2227
Joanetes	1250	0,12	82,47	1332
Sobres	750	0,06	51,90	791

Adaptando a Equação 3.2,

$$F_{verga} = m_{vela+verga+gelo} \cdot g \quad [\text{N}] \quad (3.3)$$

obtem-se os seguintes novos valores da força normal por cada verga, à semelhança dos valores apresentados anteriormente para as condições normais.

TABELA 3.12: Força aplicada a cada verga de içar (condições extremas)

Manobra	Código Cabo	Força Total [N]	Desmul.	Força Desmult. [N]
Gáveas Altas	T53 e B58	21825	6	3637
Joanetes	T55 e B69	13058	5	2612
Sobres	T54 e B64	7761	4	1940

Em suma, para as condições extremas de funcionamento, considerando apenas as forças gravitacionais, resultam os seguintes valores de forças para cada aparelho de força específicos para a manobra das ostagas.

TABELA 3.13: Dimensionamento dos aparelhos de força (ostagas) através do cálculo analítico em condições extremas de funcionamento (gelo)

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B1	Ostaga Velacho Alto	3741
E1	Ostaga do Joanete de Proa	2758
B3	Ostaga do Joanete	2758
E3	Ostaga da Gávea Alta	3741

Forças Referentes aos Braços

A manobra de bracear os mastros, é na prática uma rotação das vergas sobre o seu eixo. Nesta operação a força necessária não resulta da força normal, pois as vergas não se encontram suspensas, mas sim do atrito do sistema, nomeadamente devido à massa das vergas. Na manobra de bracear, o cálculo das forças foi efetuado para as três vergas inferiores (papafigos, gáveas baixas e gáveas altas).

O atrito calculado, resulta da massa das vergas. Neste sentido, foi necessário calcular a massa das restantes vergas de uma forma similar à apresentada anteriormente, recorrendo aos mesmos dados. Obtendo assim os seguintes valores:

TABELA 3.14: Massa Considerada para cada Vela

Massa Considerada para cada Vela				
Vela	M. Pano [kg]	M. Verga	M. Teórica [kg]	M. Considerada [kg]
Papafigos	840	2896	3736	3800
Gáveas Baixas	420	2197	2617	2700
Gáveas Altas	441	1598	2039	2100

Em condições extremas, à força normal calculada para cada verga é necessário adicionar novamente a massa do gelo acumulado ao valor das massas apresentadas na Tabela 3.14. Atualizando estes valores obteve-se uma nova massa a considerar para o cálculo da força normal (Tabela 3.15).

TABELA 3.15: Massa considerada para cada vela com a adição da acumulação da massa de gelo

Massa considerada para cada Vela com a adição da acumulação da massa de gelo				
Vela	M. Normal [kg]	Volume Gelo [m ³]	M. Gelo [kg]	M. Considerada [kg]
Papafigos	3800	0,27	190,51	3991
Gáveas Baixas	1250	0,22	157,22	2857
Gáveas Altas	750	0,18	127,01	2227

A força de atrito (F_a) obtém-se pela multiplicação da força normal (F_{verga}), obtida através das equações 3.2 e 3.3, por um coeficiente de atrito (μ_a) que se considerou igual a 1,3.

$$F_a = F_{verga} \cdot \mu_a \quad [\text{N}] \quad (3.4)$$

Da equação anterior resulta o valor da força aplicada perpendicularmente à verga. No entanto, por forma a determinar a força que é necessária transferir aos cabos por forma a vencer o atrito do sistema, requer entrar com os ângulos em que a carga é aplicada, a distância ao eixo da verga e a desmultiplicação do aparelho.

$$F_a = \frac{F_{verga} \cdot \mu_a}{\sin(\theta_L) \cdot \sin(90 - \theta_H) \cdot \text{desmultiplicação} \cdot l_{verga} \cdot 0,5} \quad [\text{N}] \quad (3.5)$$

Nas Tabelas 3.16 e 3.17 encontram-se registados os valores dos ângulos horizontais (θ_H) e longitudinais (θ_L) para cada mastro redondo.

TABELA 3.16: Ângulos dos braços em diferentes posições das vergas do mastro do Grande

Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papa Figos		Gáveas Baixas		Gáveas Altas	
		θ_L	θ_H	θ_L	θ_H	θ_L	θ_H
Grande	62°	25	7	26	15	26	24
	31°	49	8	49	17	51	26
	0°	74	9	76	20	78	30
	-31°	105	12	108	23	110	35
	-62°	146	14	148	29	150	39

TABELA 3.17: Ângulos dos braços em diferentes posições das vergas do mastro do Traquete

Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papa Figos		Gáveas Baixas		Gáveas Altas	
		θ_L	θ_H	θ_L	θ_H	θ_L	θ_H
Traquete	51°	35	20	36	30	37	39
	25°	53	23	55	34	57	42
	0°	73	27	75	38	78	47
	-25°	96	34	99	44	103	54
	-51°	131	43	135	54	138	60

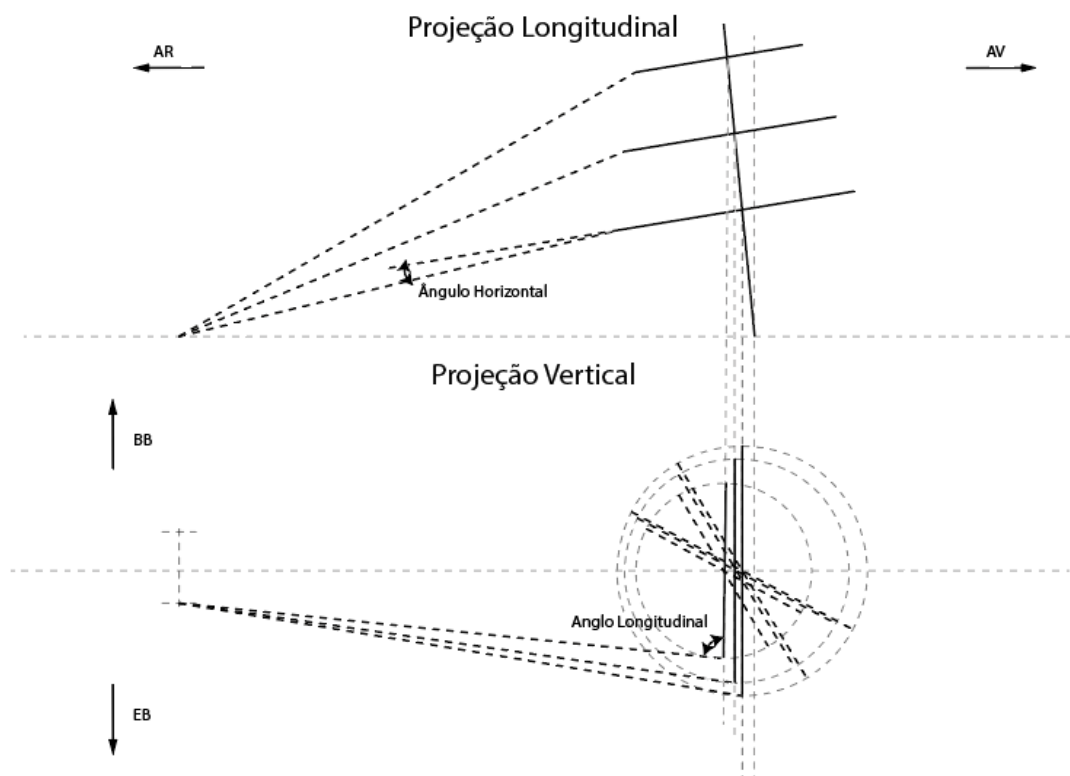


FIGURA 3.5: Esquema das projeções para obtenção dos ângulos entre os cabos e as vergas.

Os ângulos horizontais e longitudinais (θ_H e θ_L , respetivamente) são referentes à direção que os cabos fazem em relação à orientação da verga. Para determinar estes valores, recorreu-se aos desenhos técnicos, a partir dos quais se realizaram duas projeções, uma vertical e uma longitudinal. Os ângulos foram calculados para as posições extremas e uma posição intermédia, de acordo com as características de cada mastro (Figura 3.5).

Nas Tabelas 3.18 e 3.19 é possível verificar os valores das forças de atrito calculadas para as condições normais e extremas de funcionamento do sistema.

TABELA 3.18: Força de atrito na manobra de bracear em condições normais de funcionamento

Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papafigos [N]	Gáveas Baixas [N]	Gáveas Altas [N]
Grande	62°	1109,74	859,94	786,57
	31°	622,86	504,52	450,97
	0°	490,30	399,36	371,86
	-31°	492,69	415,93	409,22
	-62°	857,93	785,64	810,66
Traquete	51°	863,66	715,33	673,51
	25°	633,21	536,19	505,41
	0°	546,31	478,39	472,20
	-25°	564,59	512,51	550,01
	-51°	843,36	876,09	941,52

Dos valores apresentados, é possível identificar que as posições extremas, devido ao ângulo que o cabo faz com a orientação da verga, coincidem com as situações onde é necessário aplicar uma maior carga para vencer o atrito do sistema. Deste modo, o dimensionamento dos aparelhos, considerando o atrito em condições normais e extremas de funcionamento, corresponde aos valores máximos das posições extremas das vergas. De referir que a este valor é necessário adicionar a resultante das forças aerodinâmicas correspondentes a cada situação.

TABELA 3.19: Força de atrito na manobra de bracear em condições extremas (acumulação de gelo)

Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papafigos [N]	Gáveas Baixas [N]	Gáveas Altas [N]
Grande	62°	1165,38	910,01	834,14
	31°	654,08	533,90	478,24
	0°	514,88	422,61	394,35
	-31°	517,39	440,15	433,97
	-62°	900,95	831,39	859,69
Traquete	51°	906,96	756,98	714,25
	25°	664,95	567,41	535,98
	0°	573,70	506,24	500,76
	-25°	592,89	542,35	583,27
	-51°	885,64	927,11	998,46

TABELA 3.20: Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através do cálculo analítico da força de atrito

Cálculo da Força Correspondente a cada Ap. de Força - Condições Normais		
Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B2 / E2	Braços do Traquete	942
B4 / E4	Braços do Grande	1110
Cálculo da Força Correspondente a cada Ap. de Força - Condições Extremas		
Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B2 / E2	Braços do Traquete	998
B4 / E4	Braços do Grande	1165

3.3.2 Forças Aerodinâmicas

Forças Relativas às Ostagas

Para este tipo de estudos, que implicam intervenções a sistemas já existentes e em funcionamento, é importante conhecer bem a forma como efetivamente o aparelho é operado e reage aos diversos fatores. A determinação das forças aplicadas às ostagas é um exemplo desta boa prática. O contacto com os elementos da guarnição que operam este equipamento, permitiu perceber que a ação do vento na manobra de içar as vergas não é um fator adverso. Na realidade, quando a vela começa a abrir, a força resultante do vento permite criar um impulso positivo na verga, verticalmente, facilitando a manobra. Deste modo, para as diferentes condições de funcionamento, será apenas considerada a força normal das vergas.

Forças Relativas aos Braços

Na manobra de bracear as vergas dos mastros redondos, as cargas aerodinâmicas são determinantes. As forças que os operadores necessitam de realizar depende de diversas variáveis como a velocidade e a direção do vento ou o ângulo de ataque das vergas em relação ao vento.

A necessidade de bracear as velas surge geralmente a partir de duas possíveis situações iniciais. Podem-se bracear as vergas ainda com pano ferrado. Representa uma situação preferível em que as forças aerodinâmicas podem ser negligenciadas, aplicando-se apenas o atrito do sistema. Verificou-se que é prática comum neste contexto, bracear os mastros alguns ângulos para além dos que se prevê necessitar, facilitando os ajustes finais a favor das cargas aerodinâmicas nas velas. A outra circunstância em que pode ocorrer a necessidade de alterar a posição das vergas, é quando o parrelho vélico já se encontra em funcionamento, mas o escoamento não se encontra perpendicular à direção das vergas. Esta situação pode surgir devido a uma alteração da direção do vento ou do próprio rumo do navio, pelo que é necessário ajustar o aparelho por forma a otimizar a área velica exposta, e deste modo, aumentar a força resultante do vento que é transferida à estrutura do navio.

Nesta última situação, em termos de cargas aerodinâmicas, surge uma assimetria da distribuição de pressões em relação ao eixo vertical da vela. Ou seja, o centro de pressão na vela dirige-se para o bordo contrário ao qual o vento entra, criando assim um momento resultante da força de arrasto. Este desequilíbrio de forças nos bordos da vela resulta no momento com tendência a colocar a vela novamente numa posição perpendicular ao escoamento e deste modo igualar as forças. É

no controlo deste momento que entram os braços da verga e a partir do qual serão dimensionados os aparelhos de força (Figura 3.6) .

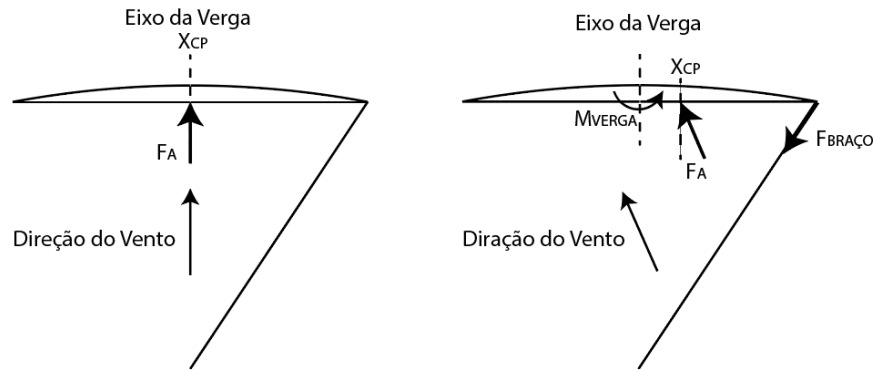


FIGURA 3.6: Diagrama bidimensional da aplicação de forças na superfície da vela.

Deste modo é necessário calcular a força de arrasto resultante do escoamento nas condições de projeto, tendo em conta que, como referido anteriormente, a situação do vento extremo não se aplica diretamente neste cálculo considerando que nestas circunstâncias o aparelho vélico não é utilizado. A força foi calculada através da equação 2.2, assumindo um coeficiente de arrasto (C_D) de 1,2 uniforme para as várias posições da vela. À semelhança do cálculo da força de atrito, a determinação das cargas aerodinâmicas na manobra de bracear foi efetuada para as três velas inferiores dos mastros redondos. Por forma a compreender a influência da velocidade de escoamento foram utilizados vários valores: 15, 20, 25 e 50 m/s. Os valores serão comparados com os resultados da simulação. O momento resultante é calculado através dos centros de pressão obtidos também através da simulação.

TABELA 3.21: Forças de arrasto calculadas analiticamente para várias velocidades de escoamento

Velas\Velocidade [m/s]	15	20	25	50
Grande	33225,9	59068,3	92294,3	369177,1
Traquete	29698,5	52797,4	82495,9	329983,6
Gávea/ Velacho Baixo	16613,0	29534,2	46147,1	184588,5
Gávea/ Velacho Alto	17442,0	31008,0	48450,0	193799,9

3.4 Simulação em Software

Como já foi referido, é necessário conhecer a geometria da vela e a distribuição de pressões para calcular as forças aerodinâmicas. Através do software *Fluent*, da *ANSYS*, numa simulação CFD foi possível obter a força de arrasto na vela em diferentes ângulos de ataque e o centro de pressão em que a força resultante é aplicada. No entanto, não foi possível simular uma vela flexível idêntica às características reais. Por forma a colmatar esta questão, foram modeladas três velas rígidas que permitem a comparação com o modelo analítico apresentado. A validação destes pressupostos será realizada através dos ensaios experimentais no túnel aerodinâmico, com a comparação das várias geometrias referidas. Uma das velas é bidimensional aproximando-se ao modelo analítico. As restantes velas são tridimensionais, em que uma apresenta uma curvatura sobre o eixo vertical e outra sobre o eixo horizontal. Estas últimas aproximam-se do formato que a vela assume quando exposta ao escoamento e afinada devidamente. Na prática, as velas quando afinadas para uma determinada situação (determinado ângulo de ataque e velocidade de escoamento), comportam-se como elementos rígidos, não alterando consideravelmente a geometria, pelo que não se prevê limitações substanciais para os pressupostos assumidos.

Durante a simulação e os ensaios experimentais, foram apenas estudados os fenómenos para a vela grande, extrapolando para as restantes velas. Por outro lado, ainda foi negligenciada a influência do restante aparelho vélico, incluído o velame. Este último aspeto poderá levar a alguns erros, no entanto, na realidade existem várias combinações do velame possíveis, em que poderá ser apenas içada a vela grande ou o traquete, e que neste caso corresponde ao cenário em que as cargas são máximas devido ao escoamento não estar obstruído pelas restantes velas. Poderá ainda ocorrer uma situação que não foi analisada, em que a influência da configuração do velame origina um aumento da força resultante do escoamento em determinadas velas, aumentando as cargas aerodinâmicas nas velas.

Para a modelação das diferentes geometrias das velas recorreu-se ao software *Solidworks*. Para este efeito, criou-se um desenho (*sketch*) da projeção da vela, num plano no caso da vela bidimensional e nos três planos para as velas tridimensionais, criando uma superfície (*boundary-surface*) à qual se atribuiu uma espessura (*thicken*). A espessura utilizada foi superior à real para permitir criar uma malha na análise de elementos finitos, no entanto não terá uma influência minimamente

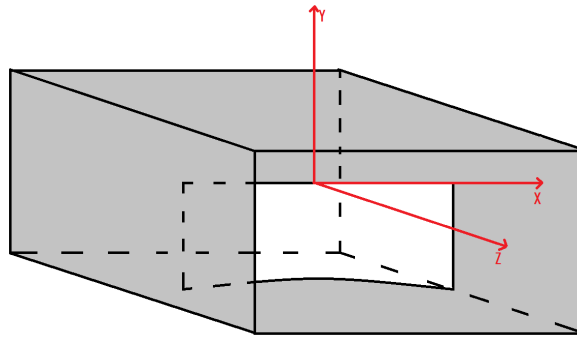


FIGURA 3.7: Referencial cartesiano adotado para a simulação CFD.

notória, pois a flexibilidade da vela não está a ser estudada e a perturbação consequente no escoamento lateral pode ser negligenciada. No Apêndice G é possível verificar as diferenças nas geometrias das velas modeladas.

Já através do *Fluent*, foi possível importar as geometrias modeladas através do *Solidworks*, e editá-las através da aplicação *Design Modeler* por forma a adaptá-las às simulações. Neste passo foi criado um paralelepípedo com a vela no seu interior (função *encloser*), idêntico a um túnel aerodinâmico virtual, e definiu-se a posição da vela. O referencial cartesiano adotado durante esta fase e segundo o qual se analisaram os resultados encontra-se na Figura 3.7. O eixo do OZ corresponde à direção do escoamento, OY é o eixo vertical da vela, sobre o qual se dá a rotação por forma a variar o ângulo de ataque, e OX que é coincidente com verga da vela.

Construído o paralelepípedo em torno da vela e realizando a rotação (positiva) sobre o eixo OY , correspondente a cada posição da verga e que por consequência leva à diminuição do ângulo de ataque, obteve-se o resultado apresentado na Figura 3.8.

Após este procedimento, definiu-se uma malha (*mesh*) no conjunto da vela e do módulo por forma a aplicar a análise de elementos finitos na simulação CFD propriamente dita, como é possível observar na Figura 3.9.

Deste modo, para as três geometrias de velas rígidas foram definidas as várias posições das vergas, diminuindo o ângulo de ataque, que constituem várias simulações distintas, cuja variável será a velocidade de escoamento. Na Figura 3.10, identificam-se as diferentes posições estudadas para o exemplo de uma vela bidimensional. Este procedimento foi repetido para as restantes velas apresentadas.

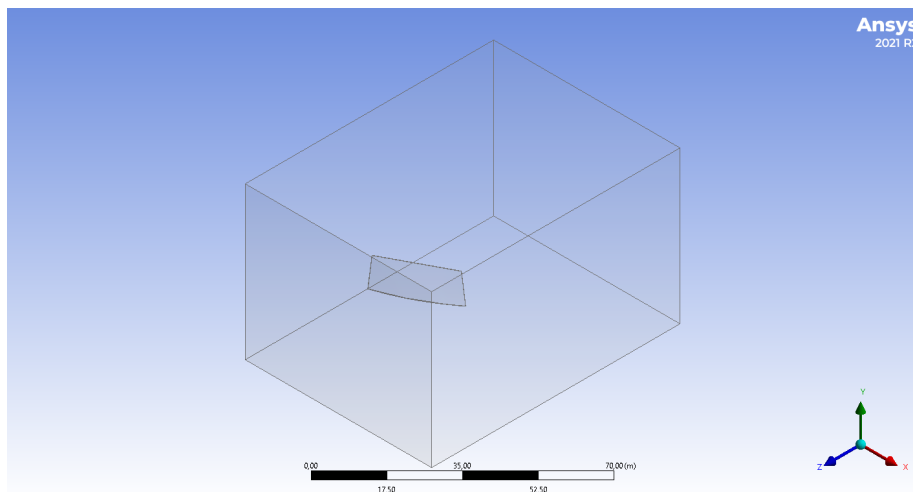


FIGURA 3.8: Exemplo da edição da geometria de uma vela tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical).

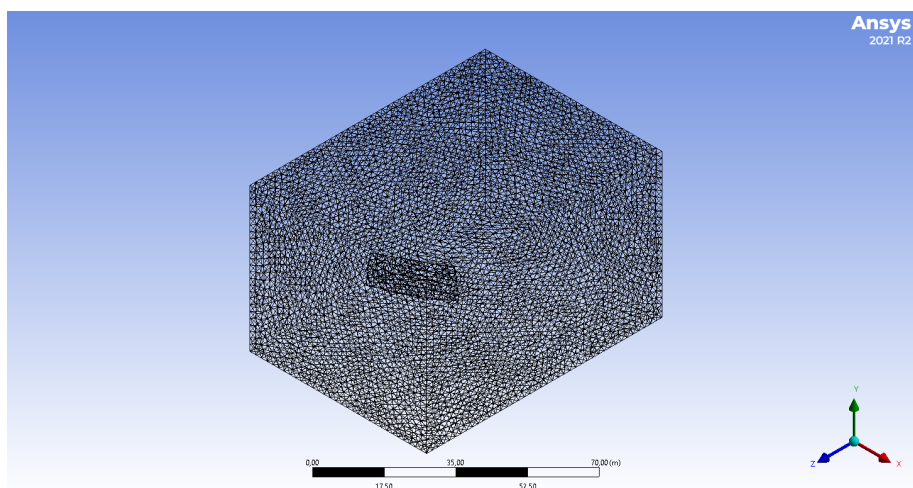


FIGURA 3.9: Exemplo da construção de uma malha para análise de elementos finitos numa vela tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical).

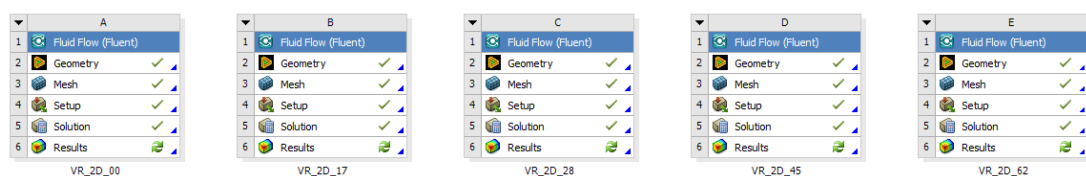


FIGURA 3.10: Diferentes posições estudadas para o exemplo de uma vela bidimensional.

As condições de fronteira definidas para o escoamento, por forma a facilitar a comparação, foram idênticas ao realizado na modelo analítico. Isto é, foram utilizadas as mesmas velocidades, em que três delas são próximas da velocidade de projeto e que permitem compreender a influência da velocidade nos resultados obtidos, e foi também efetuada uma simulação para as condições extremas apenas como mera indicação, não correspondendo a uma situação aplicável à realidade. Para além das diferentes velocidades, como já foi referido, definiram-se diferentes ângulos para a posição da vela. Esta situação permite compreender as cargas aplicadas no aparelho nos diferentes ângulos de ataque do vento. No modelo analítico, considerou-se um valor constante, pois assumiu-se um coeficiente de arrasto continuo para as várias posições. Por definição, no *Fluent*, ao selecionar o fluido como ar, considerou-se uma intensidade de turbulência de 5 por cento, uma densidade do ar igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$ e uma viscosidade de $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$.

Através dos dados obtidos na simulação, representados no gráfico da Figura 3.11 é possível verificar que a força de arrasto, à semelhança do que se obteve no cálculo analítico, aumenta com o incremento da velocidade. Este valor vai diminuindo com a rotação da verga, isto é, com a diminuição da área velica projetada e por consequência com a redução do coeficiente de arrasto. A diferença obtida entre as várias geometrias não é significativa, o que sugere que a aproximação bidimensional da vela não influencia consideravelmente os resultados. De referir que os valores da força de arrasto correspondem à velocidade de projeto (20 m/s).

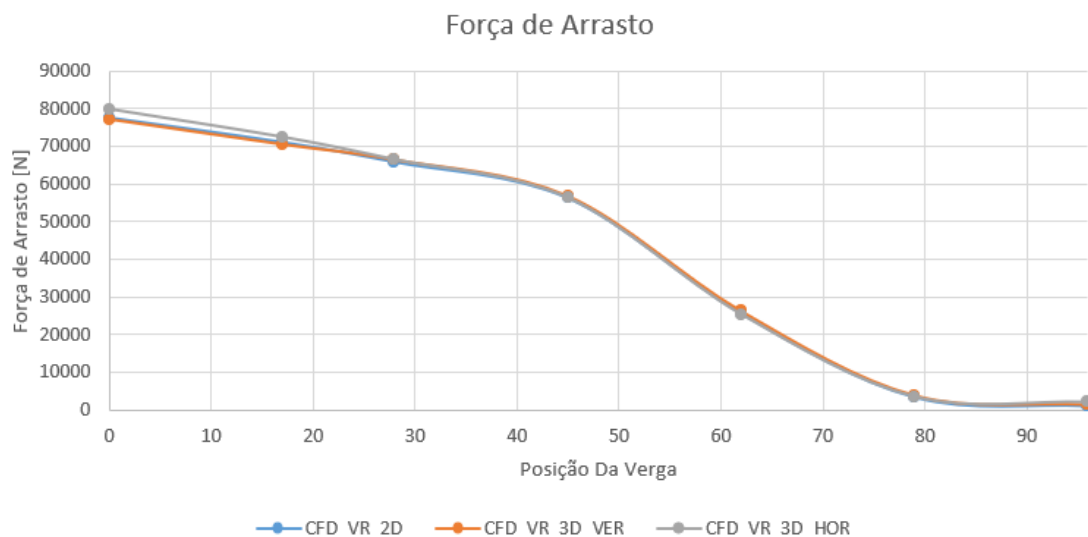


FIGURA 3.11: Perfil da força de arrasto para diferentes posições da verga.

Através da equação 2.2, verifica-se que a força de arrasto é diretamente proporcional à área velica e ao coeficiente de arrasto. Uma das principais razões pela diminuição da força de arrasto no movimento de rotação das vergas é a diminuição da área velica projetada na direção do escoamento. Porém, o coeficiente de atrito também segue uma tendência de diminuição ao longo deste movimento, no entanto sofre algumas flutuações.

O gráfico apresentado na Figura 3.12, representa o perfil da variação do coeficiente de arrasto à medida que o ângulo de ataque vai diminuindo (maior rotação da vela). Uma primeira conclusão que se pode retirar do gráfico é que o comportamento das diferentes geometrias é muito idêntico, seguindo a mesma tendência, corroborando os pressupostos assumidos quanto à questão de considerar uma forma bidimensional. Por outro lado, o valor de 1,2 considerado para coeficiente de arrasto mostrou ser uma boa aproximação, representando um valor intermédio das várias posições da verga.

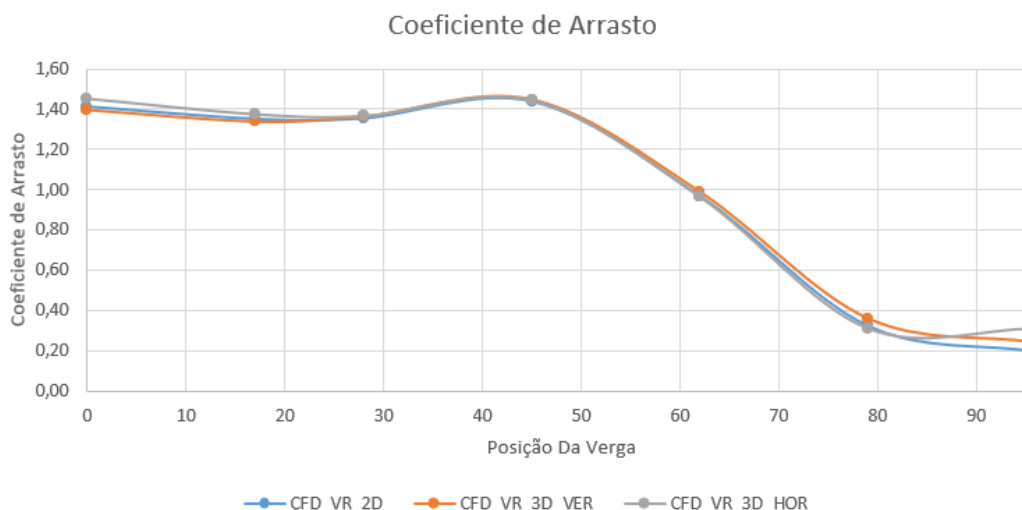


FIGURA 3.12: Perfil do coeficiente de arrasto para diferentes posições da verga.

De referir que os valores obtidos e a sua variação de acordo com o ângulo de ataque são muito idênticos aos que se verificou na bibliografia analisada, nomeadamente no trabalho de Lasher e Flaherty. No gráfico da Figura 2.12, apesar da situação estar invertida, isto é, o ângulo de ataque nesta imagem inicia-se paralelamente à direção da verga, enquanto na Figura 3.12 tem como referência a perpendicular à verga. Observa-se em ambos os gráficos, um valor máximo e constante do coeficiente de arrasto entre a perpendicular e os 45 graus, que vai diminuindo no sentido da direção do escoamento se aproximar de uma direção paralela à verga.

Numa posição inicial, em que o escoamento é perpendicular à vela, ou seja, com um ângulo de ataque máximo, a resultante das cargas aerodinâmicas corresponde unicamente à força de arrasto. À medida que o ângulo de ataque vai diminuindo, surge a componente da força de sustentação, que atinge, de uma forma idêntica à força de arrasto, um valor máximo com um ângulo de ataque de 45 graus. Nas Figuras 3.13 e 3.14 é possível observar graficamente a evolução da força de sustentação e do respetivo coeficiente.

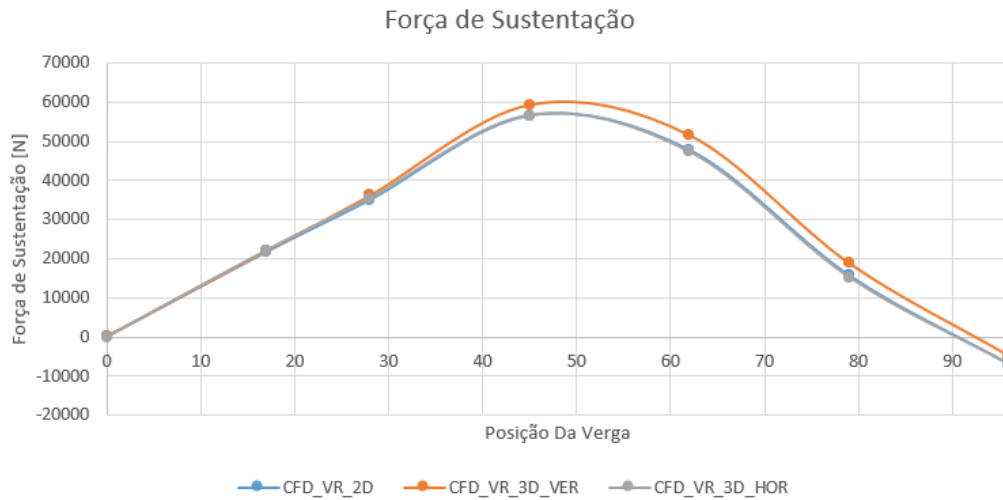


FIGURA 3.13: Perfil da força de sustentação para diferentes posições da verga.

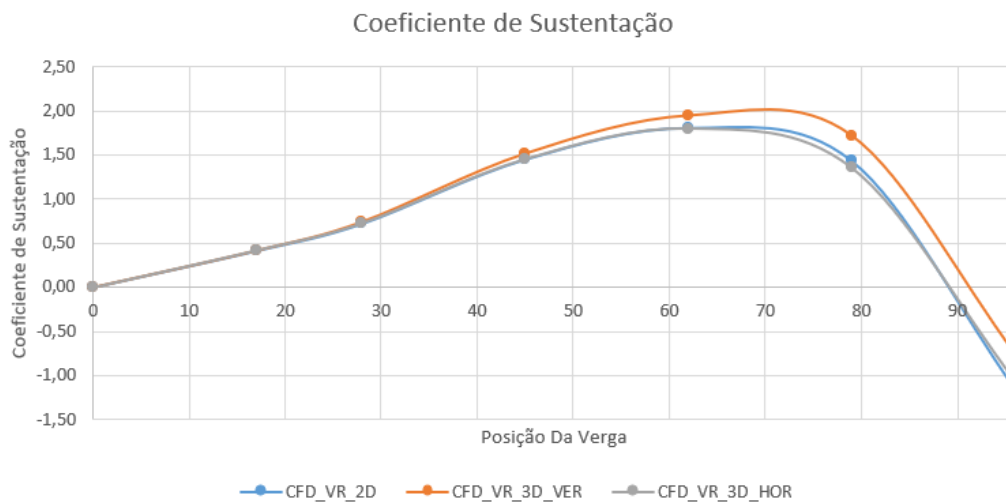


FIGURA 3.14: Perfil do coeficiente de sustentação para diferentes posições da verga.

A resultante das cargas aerodinâmicas obteve-se pela soma vetorial da força de arrasto e de sustentação obtidas na simulação CFD. Na Figura 3.15 observa-se a os valores da soma vetorial das duas componentes referidas. O máximo das cargas resultantes ocorre para um ângulo de ataque de 45 graus, no pico da força de arrasto e de sustentação.

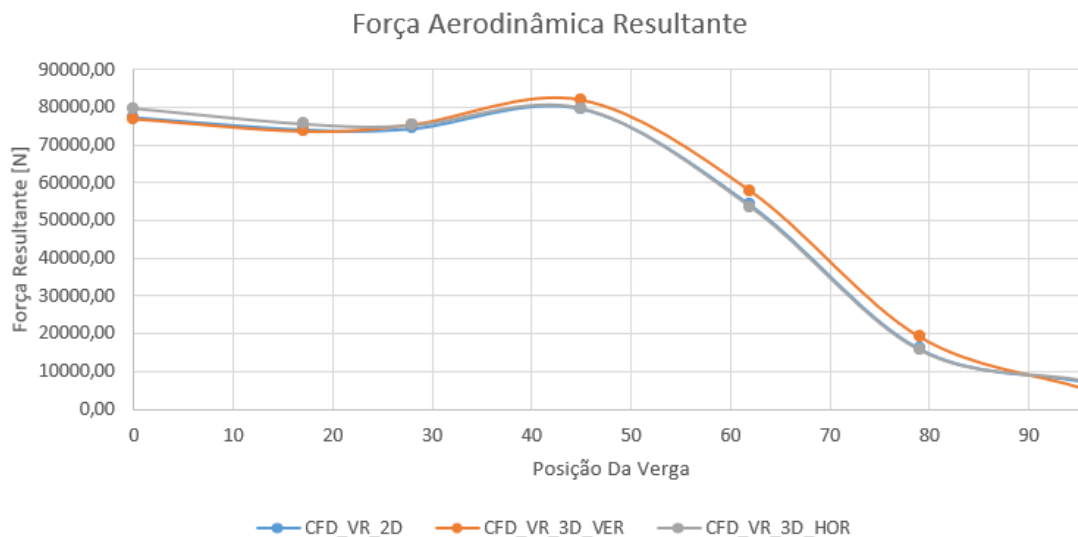


FIGURA 3.15: Perfil da força resultante das cargas aerodinâmicas para diferentes posições da verga.

Da soma vetorial da força de arrasto e de sustentação, verificou-se que para as várias posições da verga, a força resultante é sempre perpendicular à direção da vela. Por forma a determinar a componente da resultante das forças aerodinâmicas transferida à verga é necessário obter a distribuição das pressões sobre a superfície da vela, isto é, determinar o centro de pressões que representa o ponto de aplicação das cargas. Através da simulação foi possível observar, para as diferentes velocidades, posições e geometrias das velas, o comportamento do escoamento externo em relação à superfície da vela, o gradiente de pressão consequente e o centro de pressão correspondente a cada situação.

No Apêndice G, é possível observar as características do escoamento de uma vela bidimensional em várias posições, para a velocidade de projeto, e o respetivo centro de pressões. Neste caso apenas é apresentado o exemplo da vela bidimensional, no entanto o comportamento das restantes geometrias é bastante idêntico. Através da simulação realizada, foi ainda possível adquirir o valor concreto das coordenadas do centro de pressão.

Os centros de pressão, à medida que o ângulo de ataque vai diminuindo, dirigem-se para o bordo contrário, como é possível observar no gráfico da Figura 3.16.

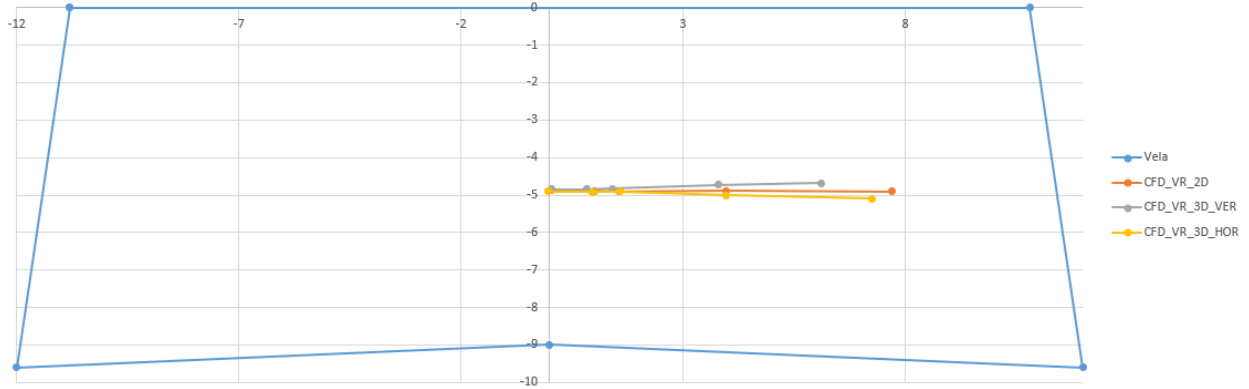


FIGURA 3.16: Localização dos centros de pressão das diferentes geometrias de velas com o aumento do ângulo de ataque (velocidade de projeto, 20m/s).

A partir dos valores dos centros de pressão, negligenciando a componente vertical, é possível determinar a que distância do eixo da verga a força resultante do vento é aplicada. Ou seja, o braço correspondente ao momento das forças aerodinâmicas. O cálculo do momento na verga (M_{verga}), é obtido pela multiplicação da componente vertical à verga da força de arrasto ($F_{arrasto}$) pela distância do eixo da verga ao centro de pressão (X_{cp}), equação 3.6.

$$M_{verga} = F_{arrasto} \cdot X_{cp} \quad [\text{Nm}] \quad (3.6)$$

Na Figura 3.17, observa-se o gráfico correspondente ao momento aplicado à verga resultante da força de arrasto para a velocidade de projeto (20 m/s). Numa posição inicial, com escoamento perpendicular à vela e um ângulo de ataque máximo, o centro de pressão coincide com eixo vertical da verga, pelo que o momento provocado pelas forças aerodinâmicas é nulo. À medida que a posição da verga se vai alterando, diminuindo o ângulo de ataque, o centro de pressão vai-se afastando da posição inicial, aumentando o valor do momento. Quando a posição da verga atinge um valor de 45 graus, o valor do coeficiente de arrasto começa a diminuir consideravelmente, e por consequência o momento resultante das forças aerodinâmicas sofre uma diminuição. A exceção a esta tendência é o modelo analítico, pois foi considerado um coeficiente de arrasto constante para os diferentes ângulos de ataque.

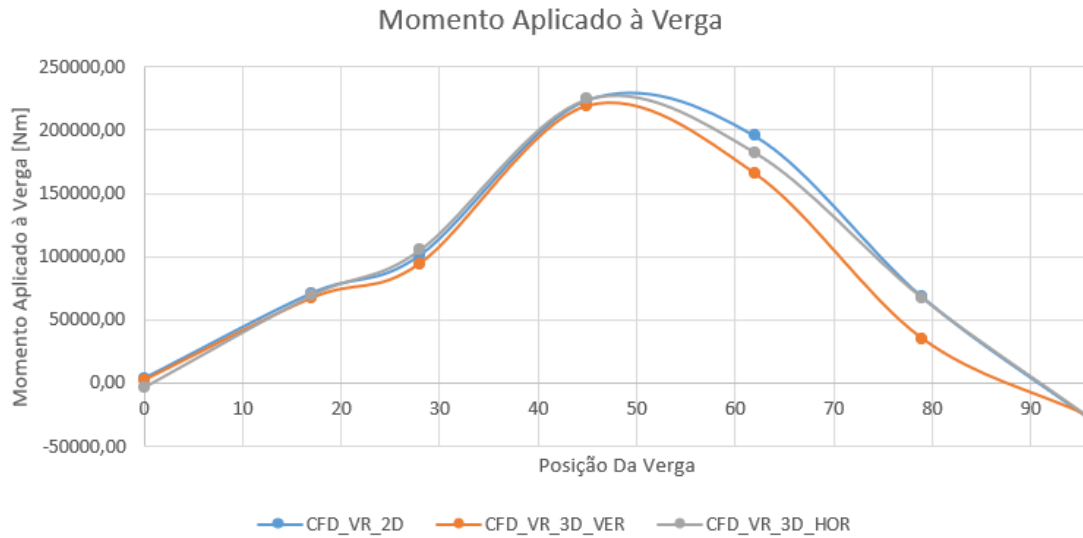


FIGURA 3.17: Momento aplicado à verga resultante da força de arrasto (velocidade de projeto, 20 m/s).

Dos resultados anteriores é possível concluir que o valor máximo do momento resultante da força de arrasto ocorre com a vela numa posição a 45 graus em relação ao escoamento, ou seja, com um ângulo de ataque próximo de 45 graus. Considerando, a ordem de grandeza dos valores relativamente elevada, comprada com a variação dos valores das várias geometrias de velas para as mesmas situações, assumiu-se um valor de momento máximo de 224 kNm. A força transferida à extremidade da verga ($F_{aeroverga}$), ou seja, a 12 metros de distância do eixo, é de 18,7 kN.

Por forma a determinar a força necessária aplicar aos cabos para controlar esta carga ($F_{aerocabos}$), é necessário considerar os ângulos dos cabos e a perpendicular à verga (Tabela 3.16) e a desmultiplicação.

$$F_{aerocabos} = \frac{F_{aeroverga}}{\sin(\theta_L) \cdot \sin(90 - \theta_H) \cdot desmultiplicação} \quad [N] \quad (3.7)$$

Na tabela 3.22, encontram-se os valores da aplicação direta da equação 3.7. Novamente, verifica-se que nas posições a força necessária transferir aos cabos é significativamente superior à força útil exercida na extremidade da verga por forma a controlar o momento resultante das cargas aerodinâmicas.

TABELA 3.22: Força aplicada aos cabos devido às cargas aerodinâmicas, obtidas através da simulação CFD para a velocidade de projeto

Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papafigos [N]	Gáveas Baixas [N]	Gáveas Altas [N]
Grande	62°	22272,16	22063,56	23328,63
	31°	12500,54	12944,50	13375,15
	0°	9840,11	10246,40	11028,75
	-31°	9888,11	10671,58	12136,99
	-62°	17218,51	20157,30	24043,00
Mastro	Posição Inicial (θ_i)	Papafigos [N]	Gáveas Baixas [N]	Gáveas Altas [N]
Traquete	51°	17333,42	18353,21	19975,41
	25°	12708,28	13756,96	14989,82
	0°	10964,38	12273,98	14004,69
	-25°	11331,12	13149,44	16312,43
	-51°	16925,99	22478,00	27924,18

Como é possível observar, os valores obtidos são bastante mais elevados, quando comparados com restantes modelos utilizados. A discrepância deve-se a fatores que não foram tidos em conta e que revelaram ter um efeito considerável nos resultados obtidos. De referir os seguintes aspetos:

- Diferenças consideráveis entre as áreas velicas das diferentes velas em estudo - Durante o processo de simulação, o foco foi compreender o funcionamento das várias geometrias de velas e com diferentes ângulos de ataque. A necessidade de simular as três velas (grande, gáveas baixas e gáveas altas) levaria a um processo bastante moroso, pelo que foi negligenciado e considerou-se extrapolar os valores. Na realidade, a área velica das gáveas baixas e gáveas altas é praticamente metade da vela simulada, este facto leva a que a força de arrasto para estas velas seja significativamente mais baixa. Este facto poderia ser colmatado com o modelo analítico, no entanto, não existe conhecimento suficiente sobre a distribuição de pressões para solucionar o problema desta forma.

- Limites de bolina - Como se pode verificar na tabela 3.22, os valores máximos obtidos correspondem às posições extremas das velas, praticando uma bolina cerrada. Sendo uma posição limite, mesmo que o ângulo de ataque diminua, já não é possível bracear mais a vela por forma aumentar o seu rendimento aerodinâmico. Neste sentido, a aplicação desta carga pode ser considerada meramente teórica, pois não se aplica a uma situação prática da manobra do velame.
- Força transferida a outros cabos e à própria estrutura - Neste estudo, considerou-se a vela rígida, ou seja, já afinada para as condições de fronteira impostas. No entanto, na realidade, existem outros cabos para os quais algumas componentes da força de arrasto são transferidas para além dos braços das vergas, como é o caso das escotas e das amuras. Reduzindo estas componentes, o momento da força de arrasto transferido às vergas será substancialmente menor. As normas das Sociedades Classificadoras, através da equação 3.1 apresentada anteriormente, entram com um coeficiente de 0,33 para a componente da força de arrasto que é transferida à extremidade da verga ou da retranca e que por sua vez é igual à força nos cabos. Os valores obtidos, entrando com um coeficiente idêntico, seriam também bastante inferiores.
- Componente vertical - No seguimento do ponto anterior, devido à direção que a vela assume sobre o eixo horizontal coincidente com a verga, existe uma componente vertical que não é considerada nos cálculos apresentados. Retirando esta componente, os valores da força transferida à verga e por consequência aos cabos seria também bastante menor. Por outro lado, esta situação leva à diminuição da área vélica projetada.
- Aplicação de conhecimento empírico na manobra - De uma forma numérica ou analítica, é muito complexo considerar determinadas variáveis, como o conhecimento aplicado pelos operadores durante a manobra. Na realidade, este fator é determinante para que durante a manobra do aparelho não se atinjam estas cargas. Folgar a vela, diminuindo a área projetada da vela, é um exemplo das ações realizadas para evitar estas situações.
- Força de Atrito - Neste caso, a força de atrito do equipamento diminui a carga resultante da força de arrasto transferida aos cabos.

Dos aspetos referidos, este é o único que é quantificável através dos dados obtidos sobre o aparelho. Deste modo, reduzindo às cargas aerodinâmicas máximas o valor de atrito obtido no modelo analítico, obtém-se o seguinte dimensionamento dos aparelhos de força a instalar para a manobra dos braços dos mastros redondos.

TABELA 3.23: Dimensionamento dos aparelhos de força (braços) através das normas das forças aerodinâmicas obtidas na simulação CFD

Aparelho de Força	Manobras Correspondentes	Força [N]
B2 / E2	Braços do Traquete	24043
B4 / E4	Braços do Grande	27924

No entanto, os valores apresentam-se bastante elevados comparando com os resultados dos modelos anteriores. Na generalidade obtém-se através deste método um coeficiente de sobredimensionamento de 3. No limite, desconhecendo as situações enumeradas anteriormente, seria necessário considerar alterar a bitola dos cabos, pois os valores obtidos indicam que seria expectável atingir a força mínima de rutura dos cabos. No entanto, é necessário ter noção que o modelo apresentado é bastante conservador, em que os valores apenas auxiliam a compreensão do comportamento das velas. Ou seja, é necessário analisar estes resultados de uma perspetiva qualitativa e não quantitativa.

3.5 Método Experimental

3.5.1 Objetivos dos Ensaios Experimentais

O método experimental teve como propósito verificar a influência dos pressupostos assumidos no modelo analítico e validar a adaptação dos resultados obtidos através da simulação CFD para o modelo real. Os principais objetivos definidos para a preparação dos ensaios experimentais foram os seguintes:

- Obter os coeficientes das forças aerodinâmicas;
- Obter o momento resultante da força de arrasto;
- Obter a distribuição de pressões, nomeadamente o centro de pressão;
- Observar as características do escoamento;
- Verificar o comportamento elástico das velas;
- Otimizar a afinação das velas.

3.5.2 Variáveis em Estudo

Por forma a um melhor aproveitamento dos ensaios, definiram-se as seguintes variáveis de estudo de acordo com os objetivos traçados (Figura 3.18):

- Velas rígidas e velas flexíveis;
- Modelos bidimensionais e tridimensionais;
- Variação da posição das vergas e consequentemente a variação do ângulo de ataque;
- Velocidades de escoamento diferentes;

De referir que as variáveis de estudo se aproximam das condições utilizadas na simulação CFD. Isto é, as posições das vergas foram as mesmas, que geraram os mesmos ângulos de ataque. Em relação às velocidades de escoamento, a sua escolha foi deliberada por forma a permitir uma extensão aceitável nas molas. De acordo com a calibração da mola, por forma a obter extensões visíveis, pretendia-se uma força próxima dos 10 N. Entrando com este valor como força de arrasto, assumindo 1,2 para o coeficiente de arrasto e a área velica do modelo à escala, através da equação 2.2 obteve-se a seguinte relação entre a força de arrasto no modelo em estudo e a velocidade de escoamento, em m/s (Figura 3.19).

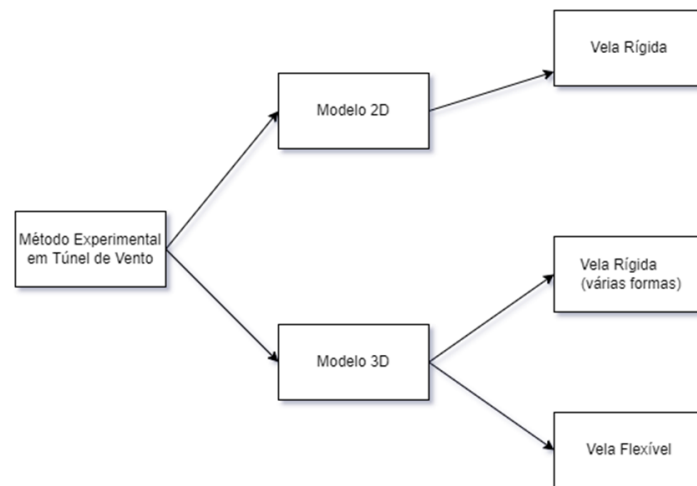


FIGURA 3.18: Diagrama das variáveis em estudo nos ensaios experimentais em túnel aerodinâmico.

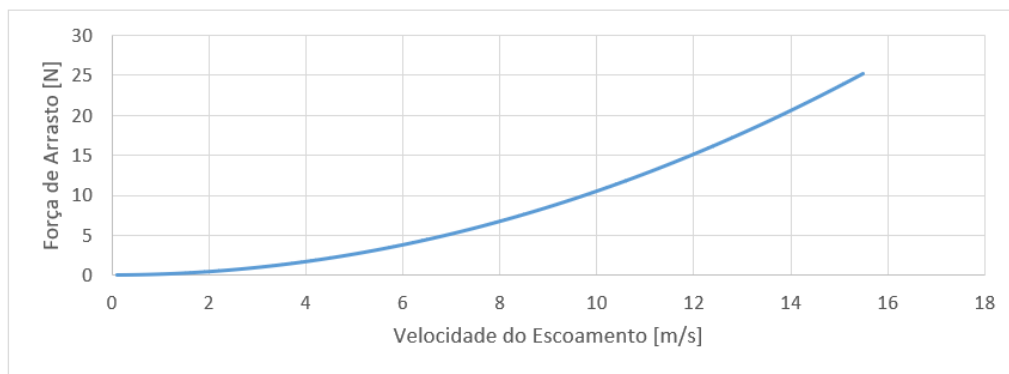


FIGURA 3.19: Relação entre a velocidade de escoamento e a força de arrasto para o modelo à escala em estudo.

De onde se conclui que as velocidades de escoamento deverão rondar os 10 m/s.

3.5.3 Construção do Modelo à Escala

As características do túnel aerodinâmico, já apresentadas, delimitaram as características do modelo experimental à escala. Foi decidido, à semelhança da simulação CFD, apenas estudar os fenómenos para a vela Grande e extrapolar para as restantes. Devido às dimensões do túnel, qualquer tentativa de ensaios de mais de uma vela em simultâneo levaria a redução muito significativa do modelo à escala, aumentando a possibilidade de erros nos resultados.

Foi decidido construir um modelo à escala de 1:40, por forma a manter o rácio de Blockage inferior a 10 por cento. Deste modo, contruiu-se um modelo da vela com 0,54 m de largura na zona da verga, com uma altura de 0,241 m, respeitando as diferentes relações dimensionais da vela do mastro do Grande. Deste modo, negligenciando a área exposta do mecanismo onde a vela está instalada, obteve-se uma área velica de $0,137 \text{ m}^2$. O rácio de Blockage resultante pode ser determinado pela equação 2.7, resultando um valor de 9,1 %.

$$Blockage = \frac{S_{modelo}}{A_{tunel}} = \frac{0,137}{1,500} = 0,091 = 9,1\% \quad (3.8)$$

Iniciou-se com a construção da base do modelo. O mecanismo desenvolvido permite a rotação da vela através de um mastro instalado sobre um rolamento e foi dimensionado por forma a manter a relação dos ângulos dos cabos semelhantes ao modelo real para a vela grande. O modelo tem a particularidade de permitir a colocação de vários tipos de velas que são fixos ao topo do mastro de forma modelar. Na Figura 3.20 é possível observar as características do mecanismo construído.



FIGURA 3.20: Base do modelo à escala para os ensaios experimentais.

As velas construídas para os ensaios experimentais têm por base as diferentes geometrias analisadas no ponto anterior, tendo-se acrescentado uma vela tridimensional flexível para compreender as propriedades elásticas da vela. As velas rígidas foram construídas a partir de chapas de aço com 0,05 mm de espessura e cortadas a partir das relações dimensionais referidas. Nas velas rígidas tridimensionais, o formato obtido que se aproxima do aspeto real da vela foi resultado da colocação de perfis nas extremidades que controlam a curvatura da vela nos eixos pretendidos. A vela tridimensional flexível foi concebida a partir do mesmo material das velas do modelo real, *DRACON*, no entanto com uma espessura inferior. No Apêndice H é possível observar as diferentes geometrias de velas construídas para os ensaios experimentais.

A medição das forças foi feita através de uma mola e uma escala e milímetros. A calibração da mola, o funcionamento do sistema e a determinação do fator de atrito geral do sistema podem ser verificados no Apêndice H

3.5.4 Análise Dimensional

Como foi referido durante o enquadramento teórico, por forma a permitir a comparação das forças medidas diretamente é necessário cumprir os números de Reynolds da situação real e do modelo experimental. No entanto, devido à redução significativa da escala, já se previa algumas dificuldades.

Para a situação real, considerando a velocidade de projeto de 20 m/s e um comprimento característico igual à raiz quadrada da vela, obteve-se o seguinte número de Reynolds:

$$Re_{real} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 20 \cdot \sqrt{204,4}}{1,7332 \times 10^{-5}} = 2.021 \times 10^7 \quad (3.9)$$

Para o ensaio experimental, considerando a velocidade de escoamento de 10 m/s:

$$Re_{experimental} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_c}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 10 \cdot \sqrt{0,137}}{1,7332 \times 10^{-5}} = 2.616 \times 10^5 \quad (3.10)$$

Pelos valores apresentados, dado as ordens de grandezas obtidas, rapidamente se verifica que seria necessário alterar substancialmente alguns dos parâmetros por forma a cumprir ambos os números. Tendo em conta que o modelo real não

é possível alterar, a solução seria alterar as condições de fronteira dos ensaios experimentais. No entanto, por forma obter uma igualdade seria necessário aumentar a velocidade excessivamente para valores próximos dos 770 m/s, situação logisticamente impossível pelas limitações do túnel e do próprio sistema utilizado para a medição de forças. Outra solução seria diminuir a densidade do ar, sendo necessário atingir valores inferiores a 0,011 kg/m³, implicando pressurizar a câmara de ensaios a uma pressão inferior a 0,008 Pa, que também não é uma possibilidade. De referir que alguns dos túneis aerodinâmicos bastante sofisticados dedicados a estes estudos e noutras áreas como a espacial, que permitem atingir pressões bastante baixas e mesmo uma climatização independente para as câmaras de ensaios, o que não é o caso do equipamento utilizado neste trabalho.

Neste sentido, foi decidido continuar os ensaios nas condições possíveis. Apesar de não ser permitido comparar diretamente os valores das forças obtidos com a situação real, é possível comparar os comportamentos das velas, as características do escoamento e os coeficientes adimensionais referentes às forças aerodinâmicas. Em complemento, será feita uma simulação CFD pré-experimental que condiciona a situação real a uma velocidade suficientemente baixa por forma a atingir o mesmo número de Reynolds e deste modo efetuar as devidas comparações e validações.

3.5.5 Simulação CFD Pré-Experimental

Como foi referido, a redução considerável das dimensões reais para o modelo experimental dificulta o procedimento de igualar os números de Reynolds. As condições de fronteira impostas no método experimental correspondem a uma situação real em que a velocidade de escoamento seria de 0,26 m/s (aproximadamente 0,5 kts). Na realidade, o aparelho vélico não é sensível a este tipo de velocidades do vento, porém numa situação meramente teórica e para efeitos de comparação, foi feita uma simulação CFD, repetindo o procedimento apresentado no ponto anterior, agora para uma velocidade de escoamento inferior. De um modo geral, os valores das forças aerodinâmicas e dos respetivos coeficientes seguem uma tendência em tudo idêntica aos resultados obtidos na simulação para a velocidade de projeto.

3.5.6 Ensaios Experimentais

Durante alguns ensaios iniciais foram testadas várias velocidades de escoamento, observando que velocidades acima dos 6 m/s permitiram uma extensão apreciável, no entanto velocidade acima dos 10 m/s afetam negativamente a estrutura do equipamento utilizado nos ensaios. Deste modo definiram-se as três velocidades

de escoamento: 6,5, 8 e 10 m/s. As velocidades foram determinadas através do manómetro instalado no túnel aerodinâmico, como foi explicado no enquadramento teórico.

Para cada vela rígida procedeu-se a dois ensaios, por forma a validar os resultados pela sua repetibilidade. A vela flexível apenas foi alvo de um ensaio. Na Figura 3.21, é possível observar dois exemplos de modelos de velas durante os ensaios realizados.



FIGURA 3.21: Imagens exemplificativas de diferentes modelos de velas durante os ensaios no túnel aerodinâmico

As extensões nas molas obtidas durante os ensaios encontram-se descritos para cada modelo de vela no Apêndice H. O processamento destes dados será retratado com maior profundidade nos próximos pontos. Neste anexo é ainda possível observar as características do escoamento obtido no túnel de vento e comparar com os resultados obtidos na simulação. O exemplo apresentado é de um modelo de uma vela rígida tridimensional com a curvatura sobre o eixo horizontal. Apesar de não ser possível obter as coordenadas do centro de pressão nos ensaios experimentais, é possível verificar que para os vários ângulos de ataque, os resultados são muito idênticos aos que se obtiveram nas simulações.

3.5.7 Processamento dos Resultados Experimentais

Através das extensões obtidas em cada ensaio para cada modelo de vela, descritos no Apêndice H da Tabela H.3 à H.6, através da equação da elasticidade da mola (H.1), obteve-se os valores das forças aplicadas no cabo (F_{cabo}) que controlava a verga nos vários ângulos de ataque estudados. A esta força foi adicionado um coeficiente de atrito do equipamento de 1,5. O cálculo do valor médio do coeficiente de atrito considerado encontra-se igualmente no anexo referido.

$$F_{cabo} = K_{mola} \cdot l_{média} \cdot 1,5 \quad [\text{N}] \quad (3.11)$$

Tendo em conta que o modelo foi construído por forma a preservar os ângulos dos cabos e a verga, reduzindo a força obtida no cabo à sua componente horizontal (θ_H) e longitudinal (θ_L), através da seguinte equação (3.12), obtém-se a força que é aplicada perpendicularmente na extremidade da verga (F_{verga}).

$$F_{verga} = F_{cabo} \cdot \sin(\theta_L) \cdot \sin(90 - \theta_H) \quad [\text{N}] \quad (3.12)$$

A força obtida anteriormente resulta do momento de rotação provocado pela força de arrasto. Deste modo, de uma forma inversa é possível calcular o momento resultante na verga através da carga medida nos cabos, apenas na sua componente perpendicular, multiplicando pela distância do eixo à extremidade onde esta é aplicada.

$$M_{verga} = F_{verga} \cdot 0,27 \quad [\text{Nm}] \quad (3.13)$$

O momento obtido é resultante da soma vetorial da força de sustentação e de arrasto, através dos dados obtidos, não é possível dividir a força resultante nas duas componentes referidas.

No gráfico da Figura 3.22, para os diferentes modelos de velas utilizados, é possível observar que de uma forma geral, o valor do momento aplicado à verga resultante da força de arrasto, vai aumentando até à posição da verga correspondente a um ângulo de ataque de 45 graus e a partir dessa posição ocorre uma atenuação do valor. Esta variação do momento resultante, obtida nos ensaios experimentais de acordo com as situações observadas durante a simulação CFD. Comparando as diferentes geometrias de velas utilizadas, é notório que a vela bidimensional obteve durante todos os ensaios um valor superior às restantes velas. Por outro lado, a vela flexível foi a que obteve uma tendência mais irregular. Este facto deve-se essencialmente às forças que são transferidas às escotas, necessárias para a sua afinação.

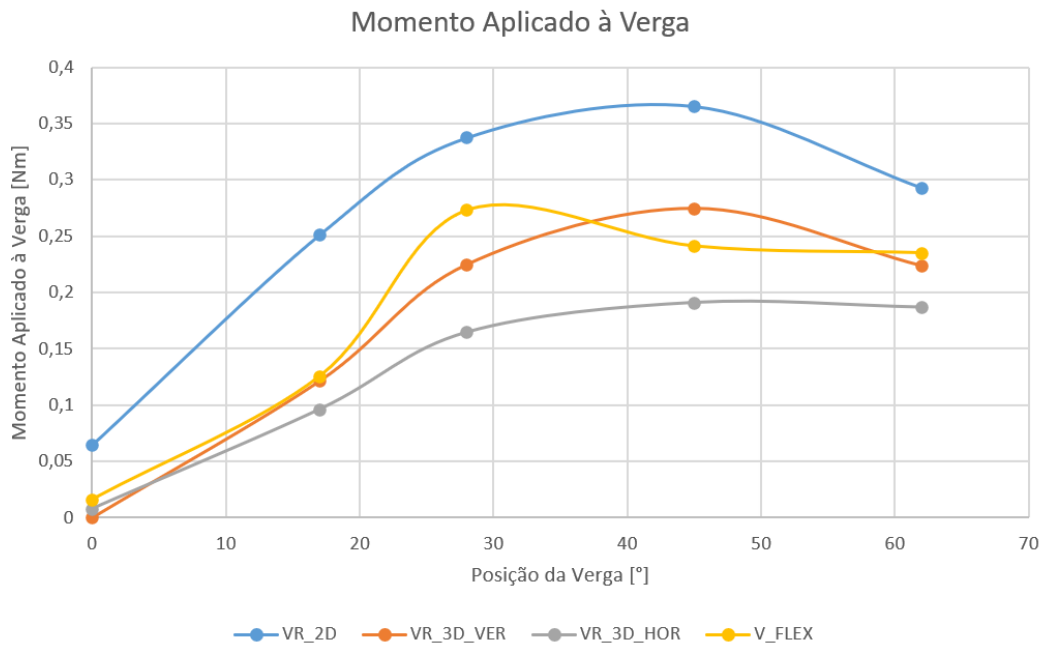


FIGURA 3.22: Momento aplicado à verga resultante da força de arrasto (ensaio em túnel aerodinâmico para velocidade de 10 m/s).

3.6 Análise e Discussão dos Resultados

Análise Empírica

Atribuindo uma força de 165 N, como capacidade máxima de aplicação de força por pessoa, ao número total de elementos associados a cada manobra, foi possível determinar a carga exercida. Os registos que permitiram este cálculo foram efetuados para velocidades do vento próximas da definida para velocidade de projeto, pelo que não foi possível obter os valores para as condições extremas previstas pelas normas. Apesar de constituir uma análise menos cientificamente fundamentada, apresenta resultados bastante regulares e viáveis.

Na determinação das forças através dos registos e de dados do modelo real, foi possível obter as tensões máximas previstas para o aparelho através do dimensionamento dos cabos. Com este método obtiveram-se alguns valores aceitáveis para determinadas manobras, no entanto, algumas poderão estar sobredimensionadas. Os valores obtidos por este método aplicam-se a todas as condições de funcionamento, representado as cargas gravitacionais e resultantes das forças aerodinâmicas.

Normas das Sociedades Classificadoras

No seguimento do ponto anterior, as Sociedades Classificadoras emitem regras a seguir para o dimensionamento e projeto dos aparelhos vélicos de navios idênticos ao caso em estudo. Através dos valores de tensão de rutura admissível e algumas diretivas para o cálculo das cargas máximas foi possível obter os resultados apresentados.

As normas referidas são aplicáveis em todas as condições de funcionamento e das diferentes cargas resultantes.

Modelo Analítico

Foi desenvolvido um modelo analítico que permitisse o cálculo das cargas aerodinâmicas e gravitacionais para as diferentes condições de funcionamento do aparelho. As cargas gravitacionais na manobra das ostagas foram calculadas através da força normal resultante da massa da verga. Para a mesma carga na manobra dos braços calculou-se o atrito do sistema, que corresponde à manobra comum de bracear previamente à ação de içar as velas. Em ambos os procedimentos descritos, nas condições de extremas foi acrescentado o valor da massa do gelo acumulado no equipamento. Estes resultados, à semelhança dos valores obtidos na análise empírica, mostraram uma tendência bastante regular e uma gama de intensidades próximas das esperadas.

Em termos de cargas aerodinâmicas, para a manobra das ostagas, não existe uma influência negativa, pelo que não foram estudadas neste caso. Para os braços, no caso das velas já se encontrarem içadas, as forças aerodinâmicas resultam num momento na verga por forma a colocá-las perpendiculares à direção do vento, atingindo uma posição de equilíbrio. A ação dos braços é controlar a rotação da verga sobre o seu eixo vertical. Deste modo foi assumido um valor do coeficiente de arrasto por forma a calcular a força resultante do vento na vela. No entanto, sem obter a distribuição de pressões, não foi possível calcular o braço resultante da distância entre o centro de pressão e o eixo vertical da verga. Para colmatar esta situação, utilizou-se os valores da distribuição de pressão obtidos através da simulação CFD.

As cargas aerodinâmicas não foram calculadas para as condições extremas, pois na prática não se aplicam a uma situação real da utilização do aparelho vélico.

Simulação CFD

A simulação CFD permitiu, sem a necessidade de construir um modelo físico, compreender o comportamento da vela, com diferentes velocidades de escoamento e ângulos de ataque. Ao obter a força de arrasto verificou-se que o valor máximo ocorre quando a vela se encontra perpendicular ao escoamento, ou seja, com um ângulo máximo de ataque. À medida que o ângulo de ataque vai diminuindo, ocorre um decréscimo da sua intensidade. Este decréscimo é resultado da diminuição acentuada do coeficiente de arrasto, para ângulos de ataque inferior a 45 graus. Até esta posição, verificou-se que o valor do coeficiente de arrasto assumido no modelo analítico mostrou ser uma boa aproximação para as velas em estudo. Por outro lado, após a modelação de várias geometrias de velas, verificou-se que esta não foi determinante nos resultados obtidos.

A simulação efetuada, foi bastante útil, essencialmente para obter a distribuição de pressões nas diferentes condições estudadas. Verificou-se que o centro de pressão, à medida que a posição da vela se afastava da direção perpendicular ao escoamento varia no sentido contrário, surgindo um desequilíbrio de forças, resultando no momento rotacional aplicado à verga. Este momento tem tendência a aumentar com a distância da vela à posição inicial (perpendicular ao escoamento), isto até aos 45 graus, posição em que a força de arrasto começa a perder intensidade devido ao decréscimo do respetivo coeficiente.

Apesar da simulação ter sido essencial por forma a compreender o comportamento da vela nas diferentes condições, verificou-se que o valor do momento aplicado à verga resultado da aplicação da força de arrasto obtida nos cálculos analíticos e na própria simulação, era consideravelmente elevado, quando comparado com os restantes modelos de cálculo. Este facto deve-se essencialmente a componente da força que é transferida aos restantes cabos e que não foi tida em conta neste trabalho. Ou seja, existem evidências suficientes através dos cálculos anteriores para descartar este método para o dimensionamento dos aparelhos de força.

Método Experimental

Com o objetivo de validar os resultados analíticos e da simulação CFD, procedeu-se à construção de um modelo à escala para ensaios num túnel aerodinâmico. Devido à redução significativa da escala do modelo, não foi possível cumprir com as leis da semelhança adimensional para as condições de projeto. Porém efetuou-se um cálculo analítico e uma simulação CFD com condições que permitiram igualar o número de Reynolds.

Nos gráficos seguintes, é possível comparar os valores através do modelo analítico, na simulação CFD e no método experimental, para as condições de fronteira que permitem igualar o número de Reynolds. Verifica-se que apesar dos valores experimentais apresentarem um decréscimo com a diminuição do ângulo de ataque, verifica-se uma tendência mais irregular, que se deve essencialmente à precisão possível durante os ensaios. De referir que os valores apresentados para cada modelo são as médias das diferentes geometrias analisadas. Conclui-se também, que apenas considerando a força de arrasto no modelo analítico e na simulação CFD, os valores experimentais, encontram-se em média abaixo destes modelos, confirmando o modo conservativo como foram aplicados.

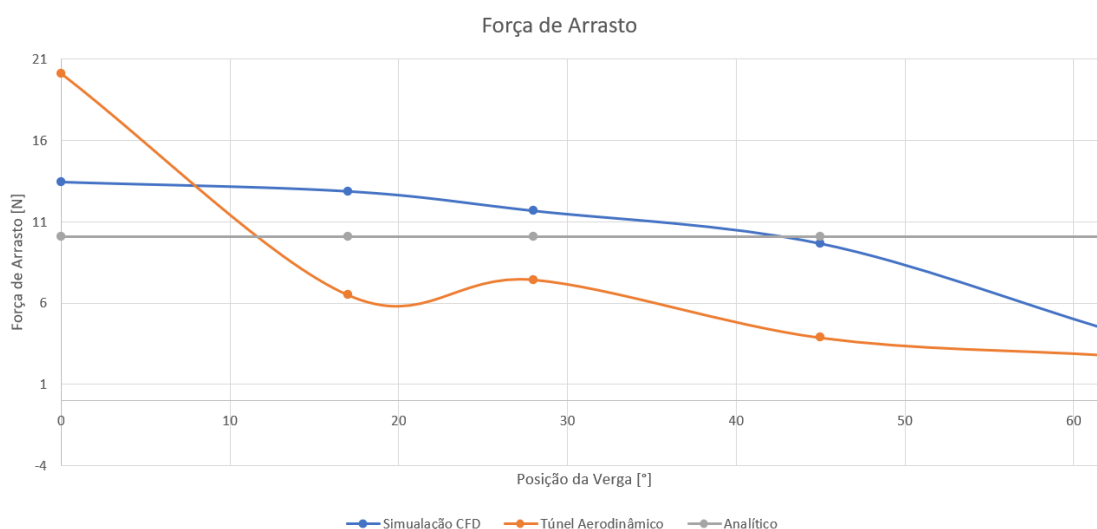


FIGURA 3.23: Perfil da força de arrasto para diferentes posições das vergas resultado da comparação dos vários modelos (0,26 m/s)).

Nas Tabelas 3.24 e 3.25 são apresentados os valores máximos para cada manobra nas diferentes condições de funcionamento, sintetizando a análise de forças dos vários modelos implementados.

NO - Não observado

SC - Sem correspondência

Concluindo a análise de forças e do comportamento das velas, tendo em conta os valores obtidos nos diferentes métodos será considerado um valor de 10 kN para os diferentes aparelhos de força. Deste modo, é possível garantir o seu funcionamento nas várias condições estudadas, incluindo as condições de projeto, não ultrapassando o valor de tensão de rutura dos cabos.

TABELA 3.24: Síntese do cálculo de forças aplicadas no aparelho vélico (ostagas)

Modelos/Cargas [N]		Ostagas			
		Condições Normais		Condições Extremas	
		C. Gravit.	C. Aero.	C. Gravit	C. Aero
M. Emp.	Elem./Manobra	4129	SC	NO	-
	Tensões Rutura	3800	-	3800	-
	Soc. Classificadoras	6333	-	6333	-
	Modelo Analítico	3430	-	3741	-
	Simulação CFD	SC	-	SC	-

TABELA 3.25: Síntese do cálculo de forças aplicadas no aparelho vélico (braços)

Modelos/Cargas [N]		Braços			
		Condições Normais		Condições Extremas	
		C. Gravit.	C. Aero.	C. Gravit	C. Aero
M. Emp.	Elem./Manobra	2477	2477	NO	NO
	Tensões Rutura	9500	9500	9500	9500
	Soc. Classificadoras	7665	7665	7665	7665
	Modelo Analítico	1110	16004	1165	18572
	Simulação CFD	SC	16004	SC	18572

Capítulo 4

Projeto de Construção

Após o cálculo das forças aplicadas ao aparelho vélico, nas várias condições de funcionamento, segue-se o projeto de construção, isto é, a concretização do estudo da instalação dos aparelhos de força na plataforma de modo a mecanizar as manobras referidas. Para este efeito, recorreu-se às normas das Sociedades Classificadoras, com o objetivo de verificar o cumprimento das regras previstas e permitir a certificação dos equipamentos. Foi realizado um estudo de mercado para analisar as soluções disponíveis e compatíveis com a configuração da instalação a bordo. Por último, de acordo os estudos referidos elaborou-se um dimensionamento dos aparelhos e a respetiva análise estrutural, segundo as regras previstas no Euro-código 3.

4.1 Normas para o Dimensionamento dos Aparelhos de Força

As normas das Sociedades Classificadoras para certificação de aparelhos de força, idênticos aos que se pretendem instalar para a manobra do velame, foram as seguintes:

- DNVGL-ST-0377 - Standard for Shipboard Lifting Appliances;
- BV NR 526 DT R03 E - Lifting Appliances Onboard Ships and Offshores Units;
- LR - Lifting Appliances in a Marine Environment;
- ABS - Certification of Lifting Appliances.

As regras analisadas, são aplicáveis a todos os equipamentos de força instalados em navios a navegar ou atracados e a plataformas *offshore*. Das quais se

salientam as secções correspondentes às partes mecânicas dos equipamentos no geral, e particularmente, o dimensionamento dos tambores dos cabrestantes.

Critérios Gerais de Segurança

Os requisitos gerais de projeto devem ter em conta o ciclo de vida do equipamento, correspondente à frequência e condições das cargas expectáveis durante o período de funcionamento, integrado na tipologia do serviço, que neste estudo consiste na manobra do velame na condição do navio a navegar.

Deste modo, existem alguns critérios de segurança para a decisão da escolha dos equipamentos:

- Pelo menos dois dispositivos independentes de acionamento do corte de emergência;
- Travão com capacidade de absorver a carga (1,5 vezes a carga de projeto), cessando o movimento, quando acionado os dispositivos de emergência;
- Capacidade de retornar a uma posição neutra quando acionado os dispositivos de emergência;
- Velocidade máxima inferior a 0,5 m/s no movimento das cargas;
- Capacidade para uma velocidade superior a 0,05 m/s.

Tensões Admissíveis na Estrutura dos Equipamentos

Neste trabalho não será feita uma análise de tensões à estrutura dos aparelhos de força, mas sim à sua instalação e fixação na plataforma. Neste sentido é necessário definir, segundo as normas aplicáveis, as tensões admissíveis, que podem obtidas pela seguinte equação,

$$\sigma_S = \sigma_y \cdot \eta_S \quad [\text{Pa}] \quad (4.1)$$

em que σ_y representa a tensão de cedência do próprio material, que deverá cumprir com um quociente entre a tensão de cedência e a tensão de rutura superior a 0,85. O fator de tensão admissível η_S , pode ser obtido através da Tabela 4.1, dependendo das tensões aplicáveis.

A análise estrutural, para além de cumprir com as normas das Sociedades Classificadoras, foi realizada através das regras previstas no Euro-Código 3, e será referida nos próximos pontos deste estudo.

TABELA 4.1: Coeficiente das Tensões Admissíveis

Tensões	Símbolo	Fator de Tensões Admissíveis - η_s
Tensão de Tração	σ_t	0,60
Tensão de Tração em Furos	σ_{th}	0,45
Tensão de Corte	τ	0,40
Tensão de Flexão	σ_b	0,60
Tensão em Soldaduras	σ_w	0,30
Tensão de Von Misses	σ_{vm}	0,75
Tensão de Von Misses (FEM)	σ_{vmfem}	0,85

Dimensionamento dos Cabrestantes

O dimensionamento do tambor do cabrestante deverá ter em conta determinadas relações por forma a permitir a sua operação em segurança. O diâmetro interior do cabrestante (d), deverá corresponder a 18 vezes o diâmetro nominal do cabo. A diferença entre o diâmetro externo (D) e o diâmetro interior, deverá ser superior a 2,5 vezes o diâmetro nominal de modo a evitar que, durante o seu funcionamento, o cabo ultrapasse as laterais.

Para a obtenção de uma tração suficiente, é indicado que o cabo possua sempre pelo menos três voltas no tambor, para isto a sua largura (b) deverá ser dimensionada de acordo com este valor. Poderá ainda existir a necessidade de conceber um desviador para que o ângulo entre o cabo e a direção do cabrestante não seja superior a 4 graus.

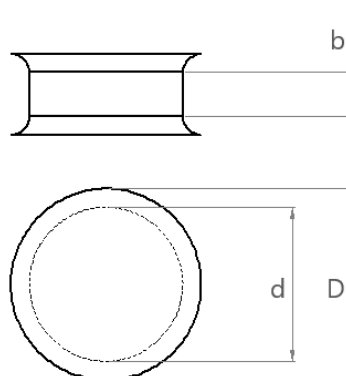


FIGURA 4.1: Diagrama das principais dimensões do tambor de um cabrestante.

As dimensões previstas para os cabrestantes apresentadas são aplicáveis à generalidade dos aparelhos de força, no entanto, em caso de evidências suficientes através do cálculo de esforços e tensões resultantes é possível certificar outros dimensionamento, ainda que bem fundamentados.

Dimensionamento dos Cabos

À semelhança das tensões na estrutura do cabrestante, a força admissível dos cabos à tração (F_{Sc}) pode ser obtida pela seguinte equação,

$$F_{Sc} = F_{MBF} \cdot \eta_{Sc} \quad [\text{N}] \quad (4.2)$$

em que F_{MBF} representa a força mínima de rutura do cabo de acordo com material de conceção, e o η_{Sc} representa o fator de segurança associado ao diâmetro do respetivo cabo, que nos aparelhos em estudo pode ser considerado um valor igual a 7.

4.2 Estudo do Mercado

Para além das normas aplicáveis aos aparelhos de força, foi necessário efetuar um estudo das soluções disponíveis no mercado com a capacidade de cumprir com requisitos do projeto. Deste modo, foi possível verificar as dimensões normalizadas e prever a adaptação da plataforma para a instalação dos mesmos.

4.2.1 Soluções Hidráulicas e Elétricas

Numa análise preliminar às soluções passíveis de aplicação, estas podem ser classificadas em duas categorias distintas: hidráulicas e elétricas. A instalação mais comum a bordo de navios é o sistema hidráulico, com uma fiabilidade comprovada, no entanto, as soluções elétricas têm sido otimizadas de uma forma substancial, apresentado inúmeras vantagens.

Num navio, as limitações em relação ao espaço disponível são determinantes nas escolhas das instalações. Nesta matéria, uma solução elétrica poderá representar uma opção mais compacta comparando com uma instalação hidráulica integral. Na realidade, uma solução hidráulica permite que a unidade de potência esteja numa localização diferente do local de acionamento, o que reduz as dimensões do sistema no local pretendido. Porém, esta solução aumenta substancialmente a complexidade do sistema e implicaria o transporte da energia hidráulica pelo navio com recurso a encanamentos, prevendo-se uma intervenção estrutural considerável. Aumentando

igualmente as necessidades de manutenção, que por si só são mais elevadas neste tipo de sistemas.

No âmbito da eficiência, os motores elétricos permitem uma redução do consumo energético até 10 por cento, comparados com os hidráulicos, no entanto, o investimento inicial atualmente é superior. Em termos de implicações ambientais, os sistemas hidráulicos, para além de uma menor eficiência, necessitam de óleos que têm de ser eliminados nas manutenções periódicas.

Ainda considerando as características concretas das manobras para as quais se pretende desenvolver as instalações, os motores elétricos permitem um maior controlo da velocidade e da posição, essencial para afinações minuciosas do velame. As soluções hidráulicas para este efeito necessitam de um sistema complexo com inúmeros acessórios extra.

Da análise feita às duas categorias principais, conclui-se que um sistema elétrico, pela simplicidade e reduzidas dimensões, será a mais apropriada para este projeto.

4.2.2 Geometrias Possíveis

Numa análise a um conjunto alargado de fornecedores de aparelhos de força com as características necessárias à instalação que se pretende desenvolver, apurou-se que no que toca à geometria dos equipamentos, existem três tipologias fundamentais. Verifica-se a existência de equipamentos concebidos para uma instalação integral acima do pavimento ou da estrutura pretendida (*above deck*), em que os componentes se encontram dentro de uma cápsula fixa à estrutura do navio, e o tambor do cabrestante instalado sobre esta. Outros sistemas adotam uma geometria que permite uma fixação ao pavimento ou estrutura junto do tambor (*thru deck*). Os restantes componentes são colocados numa zona inferior, numa instalação vertical (*thru deck - vertical*) ou perpendicular (*thru deck - 90°*). De uma forma prática, esta configuração é idêntica à anterior, no entanto não necessita de uma cápsula pois a fixação é feita diretamente entre a unidade motora e o tambor. Na Figura I.1 encontram-se os três modelos representativos das geometrias referidas.

No Apêndice I, são apresentadas várias soluções, com diferentes geometrias, disponíveis no mercado. É possível verificar que para a mesma capacidade de carga, existem soluções bastante mais compactas que representam uma solução preferível para o projeto em desenvolvimento.

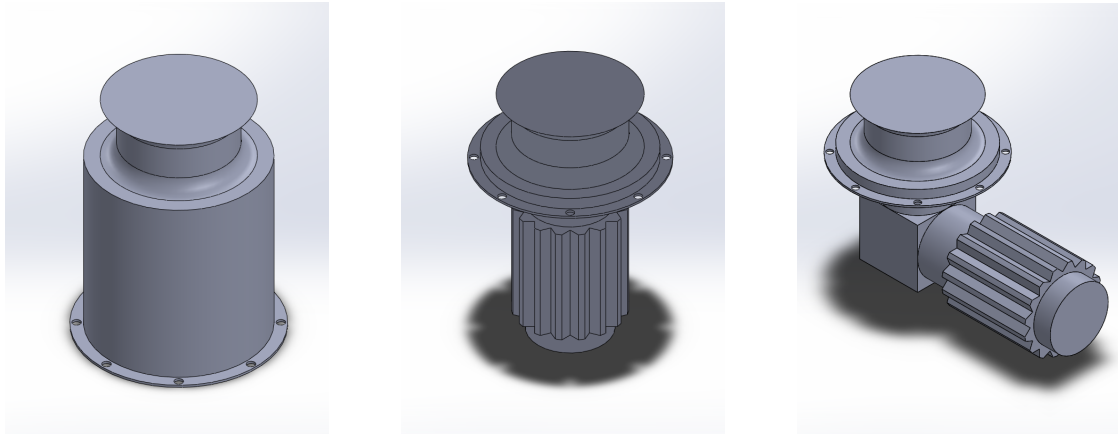


FIGURA 4.2: Modelos das diferentes geometrias de cabrestantes disponíveis no mercado

4.3 Instalação e Configuração dos Aparelhos de Força

Para além da necessidade de um dimensionamento dos aparelhos de força adequado aos esforços obtidos no ponto anterior, é essencial uma configuração que permita a compatibilidade com a normal operação do sistema vélico e de acordo com as características dimensionais da plataforma. Neste ponto, a conceção do anteprojecto foi fundamental para definir as manobras exequíveis de mecanizar.

Das intervenções semelhantes apresentadas na definição do problema, é possível observar várias conceções e configurações dos aparelhos instalados em navios idênticos. Nas imagens que é possível observar no Apêndice A, verifica-se uma tendência geral da implementação de cabrestantes. Estes equipamentos permitem uma elevada polivalência e versatilidade, e inserem-se perfeitamente nas manobras abordadas neste trabalho.

Neste sentido, é crucial considerar as características do aparelho vélico, e nomeadamente, as zonas da plataforma onde se pretende instalar os equipamentos. Recordando a localização dos cabos onde se pretende colocar os aparelhos de força apresentada no diagrama da Figura 2.16, as seguintes imagens representam a localização concreta, evidenciado as características destes pontos.

Iniciando pela proa, as ostagas das vergas de içar do traquete encontram-se divididas pelos dois bordos. A bombordo, encontram-se as ostagas do velacho alto e do sobre de proa, e a estibordo apenas a ostaga do joanete de proa (Figura 4.3 e 4.4).



FIGURA 4.3: Localização e características da ostaga do velacho alto e do sobre de proa (B1).



FIGURA 4.4: Localização e características da ostaga do joanete de proa (E1).

O principal condicionamento neste local à implementação de aparelhos de força será o espaço disponível, sendo um dos locais de passagem frequente da guarnição. Considerando este facto, a opção preferencial será a aplicação de um cabres-tante com o eixo de rotação horizontal, ou seja, um guincho, normal ao plano da

borda falsa e fixo entre o pavimento e mesa de malaguetas. O tambor do guincho ficaria numa direção vertical às respetivas malaguetas. No Apêndice J, são apresentados vários desenhos técnicos, já com dimensionamento da instalação a efetuar, que auxiliam na visualização da configuração considerada para as várias manobras. O desenho B1-E1-01 representa as dimensões gerais do local das ostagas do Traquete, sendo apresentado apenas um dos bordos devido à simetria em relação ao eixo longitudinal do navio. No desenho B1-E1-02, são apresentadas as dimensões dos aparelhos de força a instalar neste local, de acordo com as características definidas anteriormente. Os desenhos B1-E1-03/04 correspondem às características dimensionais da adaptação da plataforma e da própria instalação dos guinchos.

Esta configuração permite uma utilização híbrida do sistema mecânico, idêntica à manobra atual, em que o cabo apenas seria retirado da malagueta para a operação no guincho e retornaria após o término das afinações. Permite ainda uma aplicação integral do aparelho de força em que o cabo estaria permanentemente travado no cabrestante e mordido na malagueta apenas por redundância. A desvantagem será a necessidade de implementar dois cabrestantes no mesmo bordo (bombordo), pois a utilização seria exclusiva para cada cabo, perdendo-se a versatilidade do equipamento.

Os braços do mastro do Traquete, isto é, das três vergas inferiores, encontram-se simetricamente distribuídos pelos dois bordos do navio. Estes cabos entram pelos orifícios da borda falsa através de roldanas e seguem para as respetivas malaguetas. Como é possível observar na Figura 4.5, os cabos seguem paralelos à borda falsa sobre a mesa de malaguetas. Esta característica é determinante para a colocação dos aparelhos de força, permitindo uma instalação sobre a estrutura. Deste modo, os tambores dos cabrestantes poderão ser fixos sobre a estrutura, e os restantes componentes de acionamento na parte inferior. Esta configuração permite também uma melhor gestão do espaço reservado para os aparelhos, que representa um ponto positivo neste local de comunicação entre os alojamentos das praças e a zona central do navio.

Por outro, a instalação destes aparelhos neste local, constitui uma particularidade relevante, devido às características dimensionais da mesa de malaguetas, sendo necessário desenvolver uma estrutura adicional por forma a aumentar a sua largura e deste modo permitir a fixação correta dos equipamentos. No Apêndice J, é possível observar os desenhos técnicos correspondentes à instalação dos cabrestantes nesta zona do navio, nomeadamente da estrutura adicional com o propósito de adaptar a plataforma à instalação pretendida.



FIGURA 4.5: Localização e características dos braços do mastro do Traquete (B2 e E2).

As ostagas das vergas de içar do mastro Grande, encontram-se divididas pelos dois bordos à semelhança do mastro do Traquete (de uma forma invertida). A principal diferença deste local comparado com a zona anteriormente referida é a inexistência de limitações de espaço (Figura 4.6 e 4.7).



FIGURA 4.6: Localização e características da ostaga do joanete (B3).

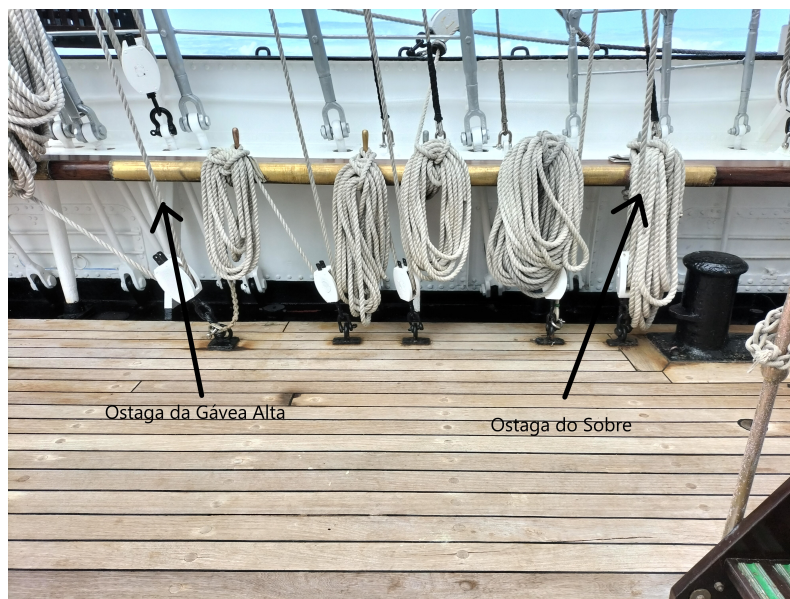


FIGURA 4.7: Localização e características da ostaga da gávea alta e do sobre (E3).

Estes cabos situam-se numa zona central do navio entre o tombadilho e castelo de proa, denominada de poço. Durante as manobras do aparelho vélico, este é um dos locais mais críticos, pelo que a colocação de um cabrestante mais polivalente, permitirá auxiliar a manobra das ostagas e também dos braços das restantes vergas do Traquete, das adriças dos entremastros, entre outras operações que se desenvolvem neste local. Deste modo, pretende-se instalar o aparelho de força na zona entre os cabos e passagem para as escadas do tombadilho, numa posição central por forma a permitir as várias manobras.

Nos desenhos técnicos B3-E3-01 a B3-E3-04, no Apêndice J, é possível observar as características dimensionais do local, do aparelho que se pretende instalar e a fixação do mesmo à plataforma.

Os braços do mastro Grande, das três vergas inferiores, encontram-se na mesa de malaguetas do tombadilho na zona lateral da casa de navegação. De uma forma semelhante aos braços do Traquete, os cabos entram do exterior por entre a balaustrada e são mordidos na mesa de malaguetas referida, simetricamente nos dois bordos (Figura 4.8).

Este local é novamente caracterizado como zona de passagem dos elementos da guarnição, com elevados constrangimentos principalmente nas manobras de atracação e de largada do navio. Neste seguimento, a melhor opção para a instalação dos



FIGURA 4.8: Localização e características dos braços do mastro do Grande (B4 e E4).

aparelhos de força será a fixação de três guinchos de acionamento independente fixos ao pavimento numa direção próxima da vertical das respectivas malaguetas. Novamente, a configuração apresentada permite uma utilização permanente dos sistemas de forças com os cabos nos tambores dos aparelhos, ou uma operação unicamente nos períodos de manobra.

Os desenhos técnicos B4-E4-01 a B4-E4-04, no Apêndice J, permitem compreender as características do local de instalação bem como a forma de pretendida para a fixação dos aparelhos.

4.4 Dimensionamento e Análise Estrutural da Instalação dos Aparelhos de Força

Tendo em conta, as normas das sociedades classificadoras, as características gerais dos equipamentos disponíveis no mercado e as dimensões dos diferentes locais da instalação dos aparelhos de força, foi elaborado um dimensionamento genérico que permitiu avançar com a análise estrutural da ligação aparafusada destes nos respetivos locais da plataforma. As características dimensionais dos cabrestantes que foram consideradas para este estudo encontram-se no Apêndice J onde, como

já foi referido, são apresentados os desenhos técnicos correspondentes à instalação pretendida.

A análise estrutural da ligação aparafusada dos aparelhos de força à plataforma foi realizada de acordo com Euro-Código 3, nomeadamente a pare 1-8, e a norma portuguesa correspondente, NP EN 1993-1-8, revista em 2010. Neste sentido, a análise de esforços teve em consideração os seguintes critérios:

- Resistência da chapa ao corte;
- Resistência do parafuso ao corte;
- Resistência ao esmagamento;
- Resistência à tração;
- Resistência ao punçoamento;
- Resistência ao escorregamento;
- Resistência ao corte combinado com tração.

Para a ligação aparafusada, foi considerado um conjunto de parafusos de alta resistência, classe 8.8, com 12 milímetros de diâmetro e furos com 13 milímetros, cujos quantitativos foram ajustados de modo a garantir a verificação de todos os critérios referidos anteriormente. Para as características da plataforma, foram consideradas chapas de 10 milímetros de aço de construção naval, grau A.

No Apêndice K é possível observar as características dos materiais da ligação analisada e a respetiva geometria. Para além destes valores, são apresentadas as verificações dos vários critérios previstos no Euro-Código 3, sequenciados para os diferentes aparelhos de força e as fixações correspondentes.

4.4.1 Ostagas do Mastro do Traquete

Para as ostagas do traquete, à semelhança dos restantes aparelhos, foi apenas realizada a análise estrutural da ligação aparafusada para um dos aparelhos, extrapolando os valores para os restantes equipamentos análogos. Para o carregamento assumiu-se uma força correspondente à capacidade máxima dos aparelhos de força (10 kN) numa direção quase vertical, no sentido do tambor do cabrestante para o olhal respetivo (Figura 4.9). Neste seguimento, os esforços determinantes para o dimensionamento da fixação destes à plataforma correspondem às forças de tração nos parafusos. Para o cálculo da resistência ao corte e ao esmagamento, foi tida em

conta a componente horizontal da força normal ao plano, isto é, na direção do eixo de rotação do cabrestante.

Com previsto, o fator de segurança mais baixo obtido foi na resistência do parafuso à tração. No entanto, o sobredimensionamento elevado obtido em todos os critérios, indica o seu cumprimento com uma margem elevada para os efeitos dinâmicos resultantes das acelerações das vergas devido ao movimentos bruscos do navio nos vários eixos.

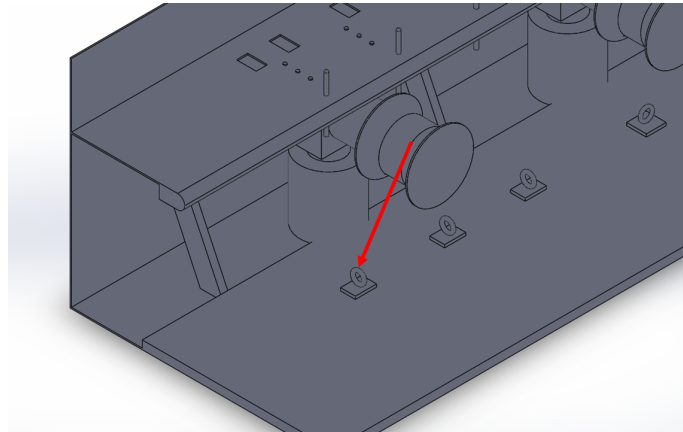


FIGURA 4.9: Características do carregamento nos aparelhos das ostagas do Traquete (B1 e E1).

4.4.2 Braços do Mastro do Traquete

Os braços do mastro do Traquete, seguem paralelos à mesa de malaguetas no sentido dos cabrestantes. Para o carregamento considerou-se uma força de tração no sentido inverso. Neste caso, a componente horizontal da força paralela ao plano do cabrestante (no sentido vante-ré) é a mais relevante. Deste facto resulta um coeficiente de segurança mais reduzido para a resistência do parafuso ao esforço de corte e ao escorregamento, ainda que com um sobredimensionamento superior a 20 vezes o carregamento considerado. A componente vertical da força aplicada é praticamente desprezável, obtendo valores de coeficiente de segurança numa ordem de grandeza considerável.

Posto isto, conclui-se que a ligação aparafusada destes aparelhos de força à mesa de malaguetas garante a segurança e integridade da fixação, restando uma margem alargada para efeitos dinâmicos. De referir ainda que, tendo em conta a configuração de acordo com a alteração da mesa de malaguetas para a colocação da

estrutura adicional, é importante o estudo desta ligação, equacionando a possibilidade de colocação de escoras complementares fixas ao pavimento.

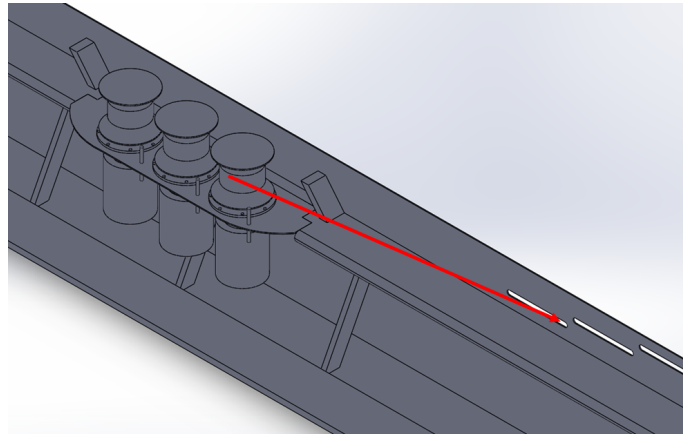


FIGURA 4.10: Características do carregamento nos aparelhos dos braços do Traquete (B2 e E2).

4.4.3 Ostagas do Mastro do Grande

A primazia pela versatilidade do aparelho de força considerado para a instalação junto das ostagas do mastro do grande, determinou a sua configuração. Ou seja, localizado numa zona mais central, fixo ao próprio pavimento, numa posição elevada para auxiliar a operação por parte dos elementos da guarnição. Apesar da versatilidade, para a análise dos critérios previstos, considerou-se apenas uma das situações das diferentes manobras possíveis. Deste modo, pressupôs-se um carregamento decorrente da força de tração no sentido do cabrestante para um dos olhais centrais, resultando um componente vertical bastante elevada em comparação com os esforços horizontais.

Deste carregamento, resultam fatores de segurança consideravelmente elevados para todos os critérios previstos, nomeadamente na resistência ao corte e esmagamento. Ou seja, verifica-se todos os critérios, garantindo um dimensionamento seguro, considerando ainda coeficiente elevados para os efeitos dinâmicos consequentes do movimento imprevisível do navio.

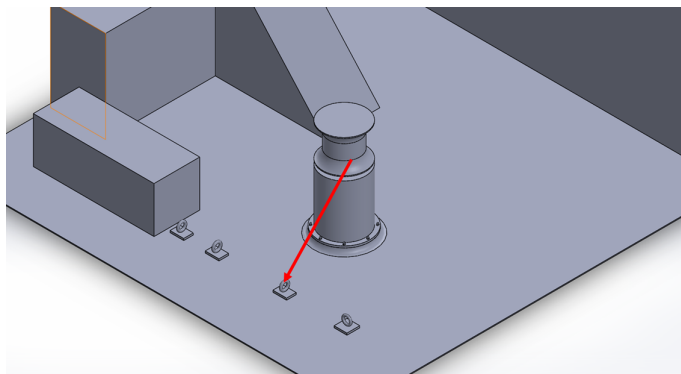


FIGURA 4.11: Características do carregamento nos aparelhos das ostagas do Grande (B3 e E3).

4.4.4 Braços do Mastro do Grande

Nos aparelhos de força desenvolvidos para a mecanização dos braços do Grande, apesar de apresentarem uma configuração bastante diferente dos braços do Traquete, o carregamento considerado é bastante idêntico, constituindo uma força de tração no sentido dos cabrestantes para os vergueiros a ré, resultando uma componente principal horizontal, paralela ao plano do cabrestante (de vante para ré) e numa componente vertical nula.

Os fatores de segurança mais baixos obtidos para este carregamento nos critérios previstos, correspondem à resistência da chapa e do parafuso ao corte, ao esmagamento e ao escorregamento. No entanto, à semelhança das situações anteriores, os valores de fator de segurança são superiores a 10 vezes o carregamento considerado, permitindo uma margem apreciável para incluir os efeitos dinâmicos referidos.

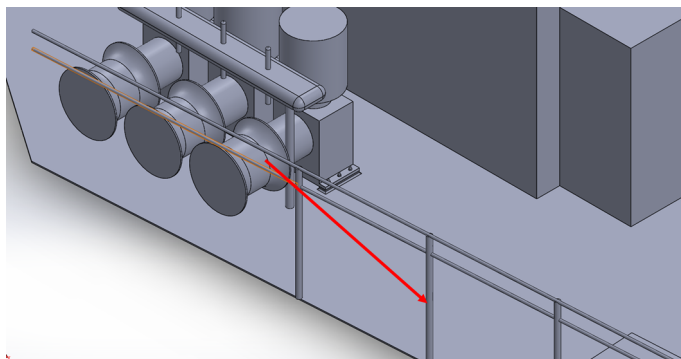


FIGURA 4.12: Características do carregamento nos aparelhos dos braços do Grande (B4 e E4).

Conclusão

O objetivo deste estudo prendeu-se com a viabilidade da implementação de aparelhos de força de modo a mecanizar algumas das manobras do aparelho vélico do N.E. “Sagres”. Esta modernização pretende capacitar o navio para uma navegação mais segura, eficiente e tecnologicamente mais desenvolvida. E posto isto, responder a uma dificuldade concreta da Marinha Portuguesa nas dificuldades de recrutamento de militares para o efetivo, reduzindo o número de elementos da guarnição.

Esta tipologia de modernizações encontra-se atualmente em desenvolvimento, na tentativa de encontrar soluções rentáveis e viáveis para a introdução de sistemas de propulsão com recurso à energia do vento para uma vasta gama de navios. Nos grandes veleiros tradicionais, como o N.E. “Sagres”, esta evolução poderá ser crucial para manter a sua atividade, e deste modo dar continuidade à tradição e ao conhecimento associado a este tipo de navegação.

O embarque no N.E. “Sagres”, foi essencial para a recolha do conhecimento técnico e empírico do funcionamento do aparelho vélico. A familiarização com a operação do sistema, permitiu conhecer as diferentes manobras, e caracterizá-las qualitativamente e quantitativamente. Os dados técnicos levantados durante este período e em estrita colaboração com a Direção de Navios, possibilitaram a realização de modelos fundamentais para análise do projeto. Neste seguimento, foi elaborado um projeto preliminar que inclui quatro zonas do navio onde se pretende instalar os aparelhos por forma a mecanizar as ostagas e os braços das vergas dos mastros redondos. Neste ponto foram também definidos os requisitos do projeto, tendo em conta já as normas das Sociedades Classificadoras.

A determinação das capacidades motoras necessárias para os aparelhos de força foi fundamentada através de uma análise das diferentes cargas aplicadas no sistema. Para este processo, foram definidos vários métodos de cálculo. Foi feita uma análise ao modelo real, que através do conhecimento empírico dos elementos embarcados, associou-se um número de pessoas necessárias a cada manobra do aparelho, e deste modo obteve-se a força necessária para determinada ação. Nos registos elaborados durante o embarque, foi feito um levantamento dimensional dos cabos,

que possibilitou a determinação das tensões de rutura dos mesmos, e deste modo calcular as tensões máximas previstas do sistema.

Foi desenvolvido um modelo analítico para o cálculo das cargas. As cargas gravitacionais das ostagas e dos braços foram obtidas pelo cálculo da força normal resultante da massa do sistema. As cargas aerodinâmicas foram parcialmente calculadas através deste modelo. Devido à impossibilidade da determinação da distribuição de pressões não foi exequível o cálculo do momento resultante exclusivamente de forma analítica. Para colmatar a questão anterior, foi feita uma simulação CFD onde foi possível obter a distribuição de pressões e os restantes parâmetros para o cálculo das cargas aerodinâmicas. No entanto, devido a vários fatores que não foram determinados neste trabalho, os valores obtidos através da combinação destes dois modelos resultaram num sobredimensionamento substancial comparando com os restantes métodos. Contudo, para a validação dos vários pressupostos assumidos nestes dois modelos, foram realizados vários ensaios experimentais num túnel aerodinâmico. Para este efeito foi utilizado um modelo à escala, no entanto, pelas reduzidas dimensões, não foi possível obter uma semelhança adimensional. Porém, os resultados dos ensaios foram bastante promissores, registando-se um comportamento das velas muito idêntico ao que foi determinado através do modelo analítico e da simulação CFD.

Após o cálculo das cargas aplicadas no sistema, de acordo com as Sociedades Classificadoras, intervenções semelhantes em veleiros análogos e um estudo de mercado, foi desenvolvido um dimensionamento dos aparelhos de força. A análise da fixação dos sistemas à plataforma foi realizada segundo os critérios do Euro-Código 3, da qual se obteve a verificação do cumprimento das regras, considerando a uma ligação aparafusada dimensionalmente segura e garantida a integridade do sistema e da plataforma.

Conclui-se deste estudo ser viável a mecanização do aparelho vélico do N.E. "Sagres". Adicionalmente, de acordo com o conhecimento desenvolvido, nomeadamente das cargas aerodinâmicas nas diferentes variáveis estudadas, como os diferentes ângulos de ataque, é evidente a possibilidade de integrar estes aparelhos num sistema de automatização do sistema geral do velame deste tipo de veleiros, e a própria automatização da navegação à vela.

Pretende-se que este trabalho seja mais um passo na direção da nova "idade da vela", possibilitando o desenvolvimento de sistemas análogos instalados noutras categorias de navios, contribuindo deste modo para a descarbonização da utilização do mar.

Trabalhos Futuros

Fica assim evidente, que este trabalho, mais do que um ponto de chegada, foi um ponto de partida para a reflexão sobre a necessidade de reinventar a navegação à vela e torná-la mais atrativa. Neste sentido ainda existe um caminho longo com várias áreas por desenvolver e questões por responder.

O conhecimento da interação entre o vento e as velas em navios de pano redondo ainda se encontra pouco desenvolvido no mundo científico. Neste âmbito, o desenvolvimento poderá seguir no sentido da evolução de métodos numéricos e na utilização de ferramentas computacionais de simulação CFD. No entanto, os ensaios em túnel de vento são novamente um futuro promissor com o desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas para a determinação da distribuição de pressões sobre a superfície da vela, da influência do escoamento resultante da interação das restantes velas, e a determinação dos coeficientes de transferência de força para os diferentes cabos do aparelho vélico.

No estudo concreto para implementação destes sistemas no N.E. “Sagres”, ainda será necessário considerar outros fatores como a integração no circuito de alimentação elétrica e garantir a produção energética suficiente de forma autónoma. É ainda fundamental o desenvolvimento dos documentos técnicos para a certificação da operação dos aparelhos e a sua manutenção. Existirá também interesse em estudar a possibilidade da integração destes aparelhos num sistema automatização combinado com a receção de sinais de vários sensores.

Bibliografia

- ABS. (2021). Guide for Certification of Lifting Appliances.
- ABS. (2020). Wind Assisted Propulsion System Installation.
- Aseanrecords.worlds. (2019). *KRI Bima Suci-945 (Indonesia): The largest naval training sail ship in the Southeast Asia*. <https://aseanrecords.world/kri-bima-suci-945-indonesia-the-largest-naval-training-sail-ship-in-southeast-asia/> (acedido em Maio de 2022)
- Associação de Portos de Portugal. (2011). *N.R.P. "Sagres"*. <http://www.portosdeportugal.pt/UserFiles/BrochuraSagres201128P29.pdf> (acedido em Maio de 2022)
- Augier, B., Bot, P., Hauville, F., & Durand, M. (2013). Dynamic behaviour of a flexible yacht sail plan. *Ocean Engineering*, 66, 32–43.
- Bot, P., Viola, I. M., Flay, R. G., & Brett, J.-S. (2014). Wind-tunnel pressure measurements on model-scale rigid downwind sails. *Ocean Engineering*, 90, 84–92.
- Brown, G. (2019). *Changing attitudes to disability in the workplace: a study with Barclays and Jubilee Sailing Trust*. <https://www.hult.edu/blog/changing-attitudes-to-disability-in-the-workplace-a-study-with-barclays-and-jubilee-sailing-trust/> (acedido em Maio de 2022)
- Bryant, D. (2011). *A huge and revolutionary ship too far ahead of its time*. <https://www.maritimeprofessional.com/blogs/post/ss-great-eastern-13337> (acedido em Maio de 2022)
- Bureau Veritas. (2015). Classification of Lifting Units (Norma número: NR 608 DT R00 E).
- Bureau Veritas. (2021a). Rules for the Certification of Lifting Appliances onboard Ships and Offshore Units (Norma número: NR 526 DT R03 E).
- Bureau Veritas. (2019). Tentative Rules for Structural Assessment of Steel Ships (Norma número: NR 646 DT R00 E).
- Bureau Veritas. (2021b). Wind Propulsion Systems (Norma número: NR 206 DT R01 E).
- Class Afloat. (2022). *Chores Aboard the Gulden Leeuw*. <https://classafloat.com/chores-aboard-the-gulden-leeuw/> (acedido em Maio de 2022)
- Costa, A. (2013). Os navios que fizeram ou alteraram a história.

- Cruising Jornal. (2018). *A Magia da Vela: Royal Clipper*. <https://www.cruisingjournal.com/pt/reportagens/a-magia-da-vela-royal-clipper> (acedido em Maio de 2022)
- Das, B., & Wang, Y. (2004). Isometric pull-push strengths in workspace: 1. Strength profiles. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 10(1), 43–58.
- de Carvalho, J. J. L. (1997). *Interacção De Um Corpo Cúbico. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica na especialidade de Aerodinâmica apresentada na Universidade Nova de Lisboa*.
- DNV-GL. (2018). Autonomous and remotely operated ships (Norma número: DNVGL-CG-0264).
- DNV-GL. (2016a). Design and construction of large modern yacht rigs (Norma número: DNVGL-ST-0412).
- DNV-GL. (2019a). Maritime services (Norma número: DNVGL-CG-0550).
- DNV-GL. (2016b). Standard for shipboard lifting appliances (Norma número: DNVGL-ST-0377).
- DNV-GL. (2016c). Tall ship rigs (Norma número: DNVGL-ST-0411).
- DNV-GL. (2019b). Wind assisted propulsion systems (Norma número: DNVGL-ST-0511).
- Domingues, F. C. (2004). *Os navios do mar oceano: teoria e empiria na arquitectura naval portuguesa dos séculos XVI e XVII*. Centro de História da Universidade de Lisboa.
- Fairtransport. (2022). *Fairtransport Cargo Under Sail*. <https://fairtransport.eu/> (acedido em Maio de 2022)
- Gonçalves, A. M. (2006). Setting Sail: Redondo versus Latino. *Revista da Armada*, 21.
- Hall, N. (2021). *Beginner's Guide to Wind Tunnels*. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bgt.html> (acedido em Maio de 2022)
- IACS. (1992). Standard Wave Data (Norma número: IACS No 34).
- Infopédia. (2022). *Embarcações dos Descobrimentos*. <http://www.infopedia.pt/embarcacoes-dos-descobrimentos> (acedido em Maio de 2022)
- Instituto Português da Qualidade. (2010). Eurocódigo 3 - Projeto de Estruturas em Aço (Parte 1-8: Projeto de Ligações)(Norma número: NP EN 1993-1-8 2010).
- Larsson, L., Eliasson, R., & Orych, M. (2022). *Principles of yacht design*. Bloomsbury Publishing.

- Lasher, W. C., & Flaherty, L. S. (2009). CFD analysis of the survivability of a square-rigged sailing vessel. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 3(1), 71–83.
- Lloyd's Register. (2014). Code for Lifting Appliances in a Marine Environment.
- Lloyd's Register. (2016). Guidance Notes for the Certification of Masts, Spars and Standing Rigging.
- Lloyd's Register. (2021). Rules for Sail Assisted Ships.
- Low tech Magazine. (2009). *Sailing at the touch of a button*. <https://www.lowtechmagazine.com/2009/04/sailing-ships-large-crew-automated-control.html> (acedido em Maio de 2022)
- Marinha do Brasil. (s.d.). *Tradições Navais*. <https://www.marinha.mil.br/tradicoes-navais> (acedido em Maio de 2022)
- Marinha Portuguesa. (s.d.). *NRP Sagres*. <https://www.marinha.pt/pt> (acedido em Maio de 2022)
- NASA. (2005). *NASA depiction of earth global atmospheric circulation*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NASA_depiction_of_earth_global_atmospheric_circulation.jpg (acedido em Maio de 2022)
- Nauteka. (s.d.). *Bima Suci*. <https://www.nauteka.com/en/bima-suci> (acedido em Maio de 2022)
- NAUTILUS International. (2021). *Sails of the century*. <https://www.nautilusint.org/en/news-insight/telegraph/sails-of-the-century/> (acedido em Maio de 2022)
- Norepower. (s.d.). <https://www.norsepower.com/> (acedido em Maio de 2022)
- Oliveira Sá. (2019). *Astra Line*. <https://www.oliveirasa.com/Portals/0/Documents/Product-Specs/astra-line.pdf?ver=2019-08-30-114755-650> (acedido em Maio de 2022)
- Röder, B. (2008). The propulsion of Sea Ships—in the Past, Present and Future. *VHT general meeting*.
- Sail Training International. (s.d.). *Wylde Swan*. <https://sailtraininginternational.org/vessel/wylde-swan/> (acedido em Maio de 2022)
- SailMaster BV. (s.d.). *Alexander von Humboldt II*. <https://sailmaster.com/portfolios/alexander-von-humboldt/> (acedido em Maio de 2022)
- Sea Cloud Cruises. (s.d.). <https://www.seacloud.com/en/> (acedido em Maio de 2022)
- Seavento. (s.d.). *Alexander von Humboldt II*. https://seavento.de/en/vessel_operator/deutsche-stiftung-sail-training/alexander-von-humboldt-ii/0001 (acedido em Maio de 2022)

- Shigley, J. (1953). *Mechanical Engineering Design* (seventh edi). McGraw-Hill.
- Ships Nostalgia. (2010). *Discovery deck lights and vents*. <https://www.shipsnostalgia.com/media/discovery-deck-lights-and-vents.321265/> (acedido em Maio de 2022)
- shutterstock. (s.d.). *A bordo de KRI Dewaruci*. <https://www.shutterstock.com/pt/video/search/a-bordo-de?missingAssetId=3045898> (acedido em Maio de 2022)
- SkySails Marine. (s.d.). *Wind power for shipping*. <https://skysails-marine.com/index.html> (acedido em Maio de 2022)
- Tradewind Voyages. (s.d.). <https://www.tradewindvoyages.com/about-us/> (acedido em Maio de 2022)
- Viola, I. M. (2009). Downwind sail aerodynamics: A CFD investigation with high grid resolution. *Ocean engineering*, 36(12-13), 974–984.
- Viola, I. M., & Flay, R. G. (2011). Sail pressures from full-scale, wind-tunnel and numerical investigations. *Ocean Engineering*, 38(16), 1733–1743.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (Eighth edi). McGraw-Hill.

Apêndice A - Navios que Possuem Mecanização do Aparelho Véllico



FIGURA A.1: Navio Alexander Von Humboldt II (SailMaster BV, s.d.).



FIGURA A.2: Navio Alexander von Humboldt II (Seavento, s.d.).



FIGURA A.3: Navio KRI Bima Suci (Nauteka, s.d.).

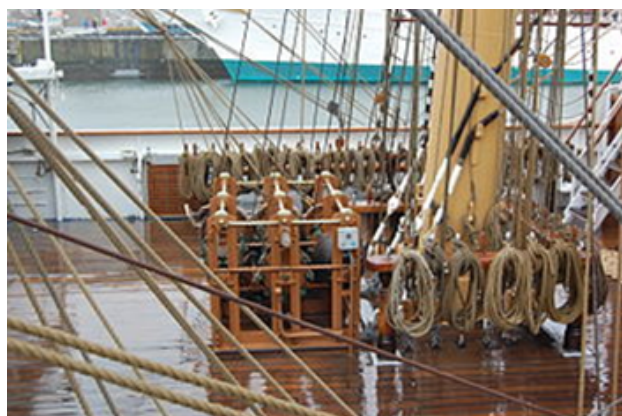


FIGURA A.4: Navio Nve Cisne Branco (Marinha do Brasil, s.d.).



FIGURA A.5: Navio KRI Dewaruci (shutterstock, s.d.).



FIGURA A.6: Navio Lord Nelson (Brown, 2019).



FIGURA A.7: Navio Royal Clipper (Cruising Jornal, 2018).

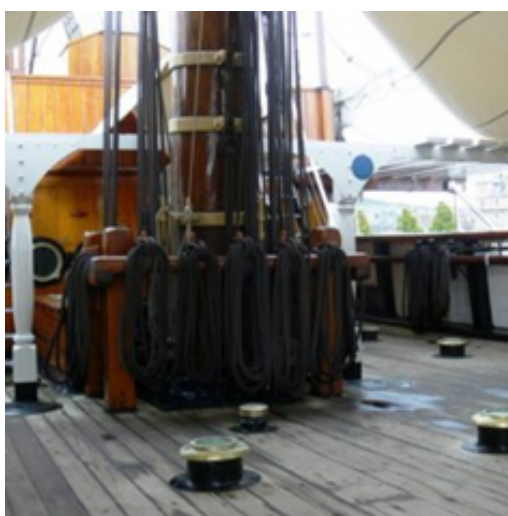


FIGURA A.8: Stavros S Niarchos (Ships Nostalgia, 2010).



FIGURA A.9: Navio Golden Horizon (Tradewind Voyages, s.d.).



FIGURA A.10: Navio Sea Cloud II (Sea Cloud Cruises, s.d.).



FIGURA A.11: Navio Gulden Leeuw (Class Afloat, 2022).



FIGURA A.12: Navio Wylde Swan (Sail Training International, s.d.).

TABELA A.1: Lista de navios que possuem mecanização do aparelho vélico

Nome	Ano	Bandeira	Operador	Tipo	Vel.[m ²]	D.[t]	Função
Alexander von Humboldt II	2011	Alemanha	Deutsche Stiftung ST	Barca	1360	992	Navio-Escola
Belem	1896	França	Foundation Belem	Barca	1000,5	750	Navio-Escola
KRI Bina Suci	2017	Indonésia	Marinha Indonésia	Barca	3352	2346	Navio-Escola
Cisne Branco	1999	Brasil	Marinha Brasil	Full-Rigged	2195	1038	Navio-Escola
Creole	1927	UK	Burgess	Schooner	1640	680	N.Passageiros
Dannmark	1932	Dinamarca	Marinha Dinamarca	Full-Rigged	-	790	Navio-Escola
Dar Młodzieży	1981	Polónia	Gdynia M. Academy	Full-Rigged	3015	2946	Navio-Escola
KRI Dewaruci	1953	Indonésia	Marinha Indonésia	Barquentine	1091	847	Navio-Escola
Eendracht	1989	Holanda	Stichting Zeilschip	Schooner	1300	-	Navio-Escola
Juan Sebastián Elcano	1927	Espanha	Marinha Espanhola	Barquentine	2870	3613	Navio-Escola
Kaiwo Maru	1989	Japão	N.I. Sea Training	Barca	2760	2556	Navio-Escola
Nippon Maru II	1984	Japão	Governo Japonês	Barca	2760	2981	Navio-Escola
Royal Clipper	1902	Malta	Star Clippers	Full-Rigged	5202	5000	N.Passageiros
Stad Amsterdam	2000	Holanda	Randstad Holding	Full-Rigged	2200	1083	Navio-Escola
Stavros S Niarchos	2000	UK	TallShips Y. Trust	Brig	1162	635	Navio-Escola
Unión	2014	Peru	Marinha do Peru	Barca	3402	3200	Navio-Escola
Young Endeavour	1987	Austrália	Young Endeavour	Barquentine	511	239	N.Passageiros
Star Clipper	1992	Malta	Star Clippers	Barquentine	5202	838	N.Passageiros
Star Flyer	1990	Malta	Star Clippers	Barquentine	5202	838	N.Passageiros
Golden Horizon	2021	Croácia	Tradewind Voyages	Barca	6347	8440	N.Passageiros
Sea Cloud II	1999	Alemanhã	Sea Cruises	Barca	4100	3489	N.Passageiros
Gulden Leeuw	1937	Holanda	P & T Charters	Barquentine	1400	491	N.Passageiros
Wyld Swan	1920	Holanda	Wyld Swan	Barquentine	1130	269	Navio-Escola

Apêndice B - Documentação Técnica - Direção de Navios

TABELA B.1: Documentação Técnica Disponibilizada pela Direção de Navios

Âmbito	Código	Descrição
Arranjo Geral	19880486	Arranjo Geral-Vista Longitudinal
Compartimentação	19760412	Castelo, Convés e Tombadilho
	19880480	Corte Longitudinal e Pavimentos
	19760427	Pavimentos - Projeto de Compartimentação
	19880485	Arranjo Geral Plantas
Modernizações	19890495	Modificação da Casota da Ponte
"Gorch Fock"	19740230	Plano Geométrico do "Gorch Fock"
	19820159	Perfil do "Gorch Fock"
Velame	19740227	Plano Velico
	20150065	Grande
	20150066	Traquete
	20150068	Gávea Baixa do Grande
	20150067	Gávea Alta do Grande
	20150070	Velacho Baixo do Traquete
	20150069	Velacho Alto do Grande
	20140033	Joanete dos Mastros Traquete e Grande - Verga
Aparelhos de Força	19880278	Cabrestante da Amarra
	20090085	Alteração da Base das Gruas Fassi
	20100019	Esquema dos Enc. Hidr.s das Gruas Fassi
Prod/Dist. Energia	de 19920431	Plano Distr. Circ. Eléct. Produção Distribuição de Energia
	19840504	Esquema Geral da Instalação Elétrica
Estabilidade	19724352	Prova e Cálculo de Estabilidade

Apêndice C - Dados de Entrada Relativos ao Aparelho Vélco

TABELA C.1: Dados de Entrada Relativos ao Aparelho Vélco

Mastro Gurupés			
Parâmetro		Valor	Unidade
Cumprimento total		14320	mm
Cumprimento (desde a cama)		12900	mm
Diâmetro na parte inferior		644	mm
Diâmetro a 1/2 comprimento		558	mm
Diâmetro na parte superior		318	mm
Mastro Traquete			
Altura Vertical acima WL		45300	mm
Altura acima WL		45500	mm
Altura total (base do mastro)		445224	mm
Altura desde o pavimento princ.		419858	mm
Altura do Cesto da Gávea (WL)		17700	mm
Altura Mastro Real (WL)		32650	mm
Altura do Cesto do Joanete		29950	mm
Altura do Mastaréu do Joanete		15550	mm
Inclinação do Mastro		52	mm/m
Traquete	Altura (WL)	15850	mm
	Comprimento	24000	mm
	Diâmetro nos extremos	240	mm
	Diâmetro ao centro	480	mm
	Massa	2896	kg

Mastro Traquete (continuação)			
	Parâmetro	Valor	Unidade
Velacho Baixo	Altura (WL)	21750	mm
	Comprimento	21800	mm
	Diâmetro nos extremos	218	mm
	Diâmetro ao centro	436	mm
	Massa	2197	kg
Velacho Alto	Altura (WL)	28100	mm
	Comprimento	19600	mm
	Diâmetro nos extremos	196	mm
	Diâmetro ao centro	392	mm
	Massa	1598	kg
Joanete	Altura (WL)	35600	mm
	Comprimento	15800	mm
	Diâmetro nos extremos	158	mm
	Diâmetro ao centro	316	mm
	Massa	771	kg
Sobre	Altura (WL)	41900	mm
	Comprimento	1125	mm
	Diâmetro nos extremos	113	mm
	Diâmetro ao centro	225	mm
	Massa	401	kg
	Lloyd's Length	20700	mm
	Distância Madre do Leme	55,2	m
	Boca na zona do mastro	11,1	m
Mastro Grande			
	Altura Vertical acima WL	45300	mm
	Altura acima WL	45500	mm

Mastro Grande (continuação)			
Parâmetro		Valor	Unidade
Altura total (base do mastro)		51890	mm
Altura desde o pavimento princ.		42560	mm
Altura do Cesto da Gávea (WL)		17700	mm
Altura Mastro Real (WL)		32650	mm
Altura do Cesto do Joanete		29950	mm
Altura do Mastaréu do Joanete		15550	mm
Inclinação do Mastro		70	mm/m
Grande	Altura (WL)	15850	mm
	Comprimento	24000	mm
	Diâmetro nos extremos	240	mm
	Diâmetro ao centro	480	mm
	Massa	2896	kg
Gávea Baixa	Altura (WL)	21750	mm
	Comprimento	21800	mm
	Diâmetro nos extremos	218	mm
	Diâmetro ao centro	436	mm
	Massa	2197	kg
Gávea Alta	Altura (WL)	28100	mm
	Comprimento	19600	mm
	Diâmetro nos extremos	196	mm
	Diâmetro ao centro	392	mm
	Massa	1598	kg
Joanete	Altura (WL)	35600	mm
	Comprimento	15800	mm
	Diâmetro nos extremos	158	mm
	Diâmetro ao centro	316	mm
	Massa	771	kg

Mastro Grande (continuação)			
Parâmetro		Valor	Unidade
Sobre	Altura (WL)	41900	mm
	Comprimento	1125	mm
	Diâmetro nos extremos	113	mm
	Diâmetro ao centro	225	mm
	Massa	401	kg
Lloyd's Length		20700	mm
Distância Madre do Leme		31.2	m
Boca na zona do mastro		11.8	m
Mastro Mezena			
Altura Vertical acima WL		40000	mm
Altura acima WL		40150	mm
Altura total (base do mastro)		41655	mm
Altura desde o pavimento princ.		36995	mm
Altura do terço (WL)		21455	mm
Inclinação do Mastro		87	mm/m
Retranca	Altura fixação mastro (WL)	8050	mm
	Comprimento	16400	mm
Carangueja Baixa	Altura fixação mastro (WL)	13400	mm
	Comprimento	13250	mm
Carangueja Alta	Altura fixação mastro (WL)	19530	mm
	Comprimento	10650	mm
Lloyd's Length		24455	mm
Distância Madre do Leme		12.0	m
Boca na zona do mastro		8.3	m

Velame			
Parâmetro		Valor	Unidade
Densidade		1370.0	kg/m ³
Espessura		3.0	mm
Grande	Área Velica	204.4	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	840.1	kg
Traquete	Área Velica	182.7	m ³
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	750.9	kg
Gávea Baixa	Área Velica	102.2	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	420.0	kg
Velacho Baixo	Área Velica	102.2	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	420.0	kg
Gávea Alta	Área Velica	107.3	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	441.0	kg
Velacho Alto	Área Velica	107.3	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	441.0	kg

Velame (continuação)			
Parâmetro	Valor	Unidade	
Joanete do Grande	Área Velica	100.7	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	413.9	kg
Joanete do Traquete	Área Velica	100.7	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	413.9	kg
Sobre do Traquete	Área Velica	65.9	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	270.8	kg
Sobre do Grande	Área Velica	65.9	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	270.8	kg
Estai do Velacho	Área Velica	50.9	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	209.2	kg
Bujarrona de Dentro	Área Velica	58.3	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	239.6	kg

Velame (continuação)			
	Parâmetro	Valor	Unidade
Bujarrona de Fora	Área Velica	56.12	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	230.7	kg
Giba	Área Velica	84.9	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	348.9	kg
Estai da Gávea	Área Velica	68.9	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	283.2	kg
Estai da Gávea (s.)	Área Velica	118.6	m ²
	Material	13.0	-
	Gramagem	28.9	oz
	Massa Aproximada	487.4	kg
Estai do Joanete	Área Velica	87.1	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	357.9	kg
Estai Gal. Grande	Área Velica	47.4	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	194.8	kg

Velame (continuação)			
	Parâmetro	Valor	Unidade
Estai da Mezena	Área Velica	54.08	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	222.3	kg
Estai do Gave-tope	Área Velica	71.6	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	294.3	kg
Estai Gal. Gave-tope	Área Velica	48	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	197.3	kg
Gave -tope	Área Velica	43.1	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	177.1	kg
Mezena Baixa	Área Velica	82.6	m ²
	Material	D. 640B	-
	Gramagem	14.9	oz
	Massa Aproximada	339.5	kg
Mezena Alta	Área Velica	61.1	m ²
	Material	D. 560B	-
	Gramagem	13.0	oz
	Massa Aproximada	251.1	kg

Apêndice D - Índice de Cabos da Manobra do Velame do N.E. “Sagres”

TABELA D.1: Índice dos cabos de manobra do velame do N.E. “Sagres”

Código	Nome	Localização	Mastro	Função	Aparelhos de Força	Coefficiente Desmult. Força	Bitola [mm]
G1.1	Carregadeira Punho da Giba	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a giba	Moitão	1	14
G1.2	Valuma da Giba	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a giba	Moitão	1	14
G2.1	Carregadeira do Punho da Bujarrona de Dentro	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a bujarrona de dentro	Moitão	1	14
G2.2	Valuma da Bujarrona de Dentro	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a bujarrona de dentro	Moitão	1	14
G3	Carregadeira da Vela de Estai	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a vela de estai	Moitão	1	14
G4.1	Carregadeira do punho da Bujarrona de Fora	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a bujarrona de fora	Moitão	1	14
G4.2	Valuma da Bujarrona de Fora	Castelo Proa	Gurupés	Carregar a bujarrona de fora	Moitão	1	14

G6	Escota da Bujarrona de Fora (BB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G7	Escota da Bujarrona de Dentro (BB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G8	Escota da Vela de Estai (BB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G9	Escota da Vela de Estai (EB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G10	Escota da Bujarrona de Dentro (EB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G11	Escota da Bujarrona de Fora (EB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G12	Escota da Giba (EB)	Castelo Proa	Gurupés	Caçar o pano latino	Teque	2	26
G13	Adriça da Bujarrona de Dentro	Corredor Lateral	Gurupés	Içar o pano latino	Teque	2	22
G14	Adriça da Giba	Corredor Lateral	Gurupés	Içar o pano latino	Teque	2	22
G15	Adriça da Vela de Estai	Corredor Lateral	Gurupés	Içar o pano latino	Teque	2	22
G16	Adriça da Bujarrona de Fora	Corredor Lateral	Gurupés	Içar o pano latino	Teque	2	22
T1	Escota do Velacho Baixo (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Talha Singela	3	26

T2	Estingue do Velacho Baixo (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T3	Amantilho do Traquete (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Corrigir inclinação da verga	Talha Dobrada	4	26
T4	Escota do Velacho Alto (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Talha Dobrada	4	26
T5	Estingue do Velacho Alto (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T6	Abraçadeira Velacho Alto (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Corrigir inclinação da verga	Teque	2	26
T7	Escota do Joanete de Proa (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
T8	Estingue do Joanete de Proa (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T9	Escota do Sobre de Proa (EB)	Mesa Mala-guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Teque	2	26

T10	Escota do Velacho Baixo (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Talha Singela	3	26
T11	Estingue do Velacho Baixo (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T12	Amantilho do Traquete (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Corrigir inclinação da verga	Talha Dobrada	4	26
T13	Escota do Velacho Alto (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Talha Dobrada	4	26
T14	Estingue do Velacho Alto (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T15	Abraçadeira Velacho Alto (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Corrigir inclinação da verga	Teque	2	26
T16	Escota do Joanete de Proa (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
T17	Estingue do Joanete de Proa (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14

T18	Escota do Sobre de Proa(BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
T19	Estingue do Sobre de Proa (BB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T20	Carregadeira do Punho da Pena do Estai do Galope do Grande	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Carregar pano redondo	Moitão	1	14
T21	Carregadeira do Punho da Pena do Estai do Joanete	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Carregar pano redondo	Moitão	1	14
T22	Carregadeira do Punho da Pena do Estai da Gávea	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Carregar pano redondo	Moitão	1	14
T23	Adriça do Balço	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Içar a plataf. para subir ao mastro	Talha Singela	3	26
T24	Estingue do Sobre de Proa (EB)	Mesa Mala- guetas Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T25	Traquete Briol de Dentro (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T26	Traquete Briol de Fora (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18

T27	Traquete Apaga (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T28	Traquete Talha de Lais (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T29	Velacho Baixo Briol de Dentro (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T30.	Velacho Baixo Briol de Fora (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T30.2	Velacho Baixo Sergideira (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T31	Velacho Alto Briol de Dentro (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T32.1	Velacho Alto Briol de Fora (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T32.	Velacho Alto Sergideira (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T33	Joanete Briol de Dentro (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T34.	Joanete Briol de Fora (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T34.2	Joanete Sergideira (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T35	Sobre Briol (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T36	Sobre Sergideira (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T37	Traquete Briol de Dentro (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18

T38	Traquete Briol de Fora (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T39	Traquete Apaga (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T40	Traquete Talha de Lais (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T41	Velacho Baixo Briol de Dentro (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T42	Velacho Baixo Briol de Fora (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T43	Velacho Baixo Sergideira (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T44	Velacho Alto Briol de Dentro (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T45	Velacho Alto Briol de Fora (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T46	Velacho Alto Sergideira (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T47	Joanete Briol de Dentro (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T48	Joanete Briol de Fora (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T49	Joanete Sergideira (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T50	Sobre Briol do Centro (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18

T51	Sobre Briol (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	18
T52	Sobre Sergideira (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Carregar pano	Moitão	1	12
T53	Ostaga Velacho Alto	Corredor Lateral	Traquete	Içar verga	Estralheir Dobrada	6	26
T54	Ostaga Sobre de Proa	Corredor Lateral	Traquete	Içar verga	Talha Dobrada	4	26
T55	Ostaga Joanete de Proa	Corredor Lateral	Traquete	Içar verga	Estralheir Singela	5	26
T56	Escota do Traquete (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Caçar o pano latino	Teque	2	26
T57	Escota do Traquete (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Caçar o pano latino	Teque	2	26
T58	Braço do Traquete (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T59	Braços do Velacho Baixo(BB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T60	Braços do Velacho Alto (BB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T61	Braço do Traquete (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T62	Braços do Velacho Baixo(EB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T63	Braços do Velacho Alto (EB)	Corredor Lateral	Traquete	Bracear o mastros	Teque	2	26
T64	Estingue do Traquete (BB)	Mastro Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14

T65	Estingue do Traquete (EB)	Mastro Traquete	Traquete	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
T66	Amura do Traquete (EB)	Castelo de Proa	Traquete	Caçar pano	Teque	2	26
T67	Amura do traquete (BB)	Castelo de Proa	Traquete	Caçar pano	Teque	2	26
B1	Amura do Grande (BB)	Corredor Lateral	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B2	Amura do Grande (EB)	Corredor Lateral	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B3	Escota da Gávea Baixa (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B4	Estingue da Gávea Baixa (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B5	Amantilho Grande (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Corrigir inclinação da verga	Talha Dobrada	4	26
B6	Escota Gávea Alta (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B7	Estingue Gávea Alta (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B8	Abraçadeira Gávea Baixa (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	26

B9	Escota do Joanete (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B10	Estingue do Joanete (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B11	Escotas do Sobre (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B12	Estingue do Sobre (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B13	Carregadeira do Estai do Galope do Gavetope	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Carregar pano Latino	Moitão	1	14
B14	Carregadeira Estai do Galope	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Carregar pano Latino	Moitão	1	14
B15	Carregadeira do Estai da Mezena	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Carregar pano Latino	Moitão	1	14
B16	Adriça do Balso	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Içar a plataf. para subir ao mastro	Teque	2	22

B17	Estingue do sobre (EB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B18	Escotas do Sobre (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B19	Estingue do Joanete (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B21	Escota do Joanete (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B22	Abraçadeira Gávea Baixa (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Corrigir inclinação da verga	Teque	2	26
B23	Estingue Gávea Alta (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B24	Escota Gávea Alta (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B25	Amantilho Grande (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Corrigir inclinação da verga	Talha Dobrada	4	26

B26	Estingue da Gávea Baixa (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B27	Escota da Gávea Baixa (BB)	Mesa Mala- guetas Grande	Grande	Caçar o pano redondo	Teque	2	26
B28	Escotas dos Entre Mastros (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26
B29	Escotas dos Entre Mastros (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26
B30	Escotas dos Entre Mastros (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26
B31	Grande Briol Dentro (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B32	Grande Briol Fora (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B33	Grande Apaga (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18

B34	Grande Talha de Lais (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B35	Gávea Baixa Briol Dentro (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B36.1	Gávea Baixa Briol Fora (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B36.	Gávea Baixa Sergideira (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B37	Gávea Alta Briol Dentro (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B38.	Gávea Alta Briol Fora (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B38.2	Gávea Alta Sergideira (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B39	Joanete Briol Dentro (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18

B40.1	Joanete Briol Fora (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B40.	Joanete Sergideira (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B41	Sobre Briol Centro (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B42.	Sobre Briol (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B42.2	Sobre Briol Sergideira (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B43	Escotas dos Entre Mastros (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26
B44	Escotas dos Entre Mastros (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26
B45	Escotas dos Entre Mastros (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Caçar o pano latino	Teque	2	26

B46	Grande Briol Dentro (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B47	Grande Briol Fora (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B48	Grande Apaga (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B49	Grande Talha de Lais (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B50	Gávea Baixa Briol Dentro (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B51.	Gávea Baixa Briol Fora (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B51.2	Gávea Baixa Sergideira (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B52	Gávea Alta Briol Dentro (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18

B53.1	Gávea Alta Briol Fora (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B53.	Gávea Alta Sergideira (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B54	Joanete Briol Dentro (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B55.	Joanete Briol Fora (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B55.2	Joanete Sergideira (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12
B56	Sobre Briol Centro (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B57.1	Sobre Briol (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	18
B57.	Sobre Briol Sergideira (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Carregar Pano	Moitão	1	12

B58	Ostaga Gávea Alta	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Içar verga	Estralheira Dobrada	6	26
B59	Braço Joanete de Proa (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Bracear mastro	Teque	2	22
B61	Braço Sobre de Proa (EB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Bracear mastro	Teque	2	22
B62	Patarrás Turco	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Operações com o turco	Talha Singela	3	22
B63	Adriça Estai do Joanete	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Içar pano Latino	Teque	2	22
B64	Ostaga Sobre	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Içar verga	Talha Dobrada	4	26
B65	Adriça do Estai da Gávea	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Içar pano Latino	Teque	2	22
B66	Braço Joanete de Proa (BB)	Poço Mala- guetas Laterais	Grande	Bracear mastro	Teque	2	22

B67	Braço Sobre de Proa (BB)	Poço Mala-guetas Laterais	Grande	Bracear mastro	Teque	2	22
B68	Patarrás Turco	Poço Mala-guetas Laterais	Grande	Operações com o turco	Talha Singela	3	22
B69	Ostaga joanete	Poço Mala-guetas Laterais	Grande	Içar verga	Estralheir Singela	5	26
B70	Adriça do Estai do Galope do Grande	Poço Mala-guetas Laterais	Grande	Içar pano Latino	Teque	2	24
B71	Escotas do Grande (EB)	Tombadilh	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B72	Escotas do Grande (BB)	Tombadilho	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B73	Escota do Estai do Gavetope (BB)	Tombadilh	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B74	Escota do Estai do Galope do Gavetope (BB)	Tombadilho	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B75	Escota do Estai do Gavetope (EB)	Tombadilh	Grande	Caçar pano	Teque	2	26
B76	Escota do Estai do Galope do Gavetope (EB)	Tombadilho	Grande	Caçar pano	Teque	2	26

B77	Estingue do Grande (BB)	Mesa Mala-guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
B78	Estingue do Grande (EB)	Mesa Mala-guetas Grande	Grande	Caçar e carregar pano	Teque	2	14
M1	Escota do Gavetope	Escotari da Me-zena	Mezena	Caçar pano latino	Moitão	1	26
M2	Carregadeira do Punho da Escota do Gavetope	Escotaria da Me-zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M3	Carregadeira do Punho da Escota da Mezena Alta	Escotari da Me-zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M4	Adriça do Punho da Pena da Mezena Baixa	Escotaria da Me-zena	Mezena	Içar pano Latino	Moitão	1	22
M5	Carregadeira do Punho da Pena da Mezena Alta	Escotari da Me-zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M6	Adriça do Punho da Pena da Mezena Alta	Escotaria da Me-zena	Mezena	Içar pano Latino	Moitão	1	22

M8	Carregadeira do Punho da Escota da Mezena Baixa	Escotari da Me- zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	26
M9	Escota da Mezena Alta	Escotaria da Me- zena	Mezena	Caçar pano latino	Moitão	1	20
M10	Adriça do Em- bandeiramento	Escotari da Me- zena	Mezena	Içar pano Latino	Moitão	1	14
M12	Escota da Mezena Baixa	Escotaria da Me- zena	Mezena	Caçar pano latino	Moitão	1	26
M13	Carregadeira da Valuma da Mezena Baixa	Escotari da Me- zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M14	Carregadeira da Valuma da Mezena Alta	Escotaria da Me- zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M15	Carregadeira do Punho da Pena da Mezena Baixa	Escotari da Me- zena	Mezena	Carregar pano latino	Moitão	1	14
M16	Contra Burro (EB)	Tombadilho	Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26
M17	Guardim (EB)	Tombadilho	Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26
M18	Contra Burro (BB)	Tombadilho	Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26

M19	Guardim (BB)	Tombadil Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26
M20	Burro	Tombadil Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26
M21	Burro	Tombadil Mezena	Caçar a retranca	Talha Dobrada	4	26
M23	Talha Guardim	Tombadil Mezena	Carregar pano	Teque	2	20
M25	Talha do Contra Burro	Tombadil Mezena	Carregar pano	Talha Dobrada	4	20
M27	Patarrás Turco	Tombadil Mezena	Operações com o turco	Talha Dobrada	4	20
M28	Adriça do Estai do Gavetope	Tombadil Mezena	Içar pano latino	Teque	2	20
M31	Braço do Joanete do Grande (EB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	22
M32	Braço do Sobre do Grande (EB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	22
M34	Braço do Grande (EB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	26
M35	Braço da Gávea Baixa (EB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	26
M36	Braço da Gávea Alta (EB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	26
M37	Braço da Gávea Alta (BB)	Tombadil Mezena	Bracear	Teque	2	26

M38	Braço da Gávea Baixa (BB)	Tombadilmezena	Bracear	Teque	2	26
M39	Braço do Grande (BB)	Tombad Mezena	Bracear	Teque	2	26
M41	Braço do Sobre do Grande (BB)	Tombadilmezena	Bracear	Teque	2	22
M42	Braço do Joanete do Grande (BB)	Tombad Mezena	Bracear	Teque	2	22
M43	Adriça do Gavetope	Tombadilmezena	Içar pano Latino	Teque	2	20
M44	Carregadeira Do Punho da Pena do Gavetope	Tombad Mezena	Carregar pano	Moitão	1	22
M45	Adriça do Galope do Gavetope	Tombadilmezena	Içar pano Latino	Teque	2	22
M46	Patarrás Turco	Tombad Mezena	Operações com o turco	Talha Dobrada	4	22
M48	Talha do Contra Burro	Tombadilmezena	Carregar Pano	Talha Dobrada	4	14
M49	Talha Guardim	Tombad Mezena	Carregar Pano	Teque	2	14

Apêndice E - Sociedades Classificadoras

Na Figura E.1 é possível observar as principais normas das Sociedades Classificadoras utilizadas neste trabalho. Por questões de organização, dividiram-se as normas em cinco grupos conforme o âmbito de aplicação. As normas que se enquadram nos *WPS* são referentes a veleiros em que o sistema de propulsão à vela poderá ser considerado como um sistema principal, dividido-se em duas tipologias diferentes de acordo com a complexidade do seu aparelho: os *tallships*, como o N. E. “Sagres”, e os *Iates*, de menor dimensão. Por outro lado, existem normas para navios que possuem sistemas de propulsão auxiliados por vela, os *WAPS*, que possuem um outro sistema principal de propulsão. Ainda foram analisadas normas no âmbito dos aparelhos de força, da própria estrutura geral do navio e ainda sobre documentação técnica por forma a compreender melhor os documentos necessários para obter as certificações dos sistemas.

Ao longo deste ponto do trabalho serão apresentados aspetos das normas aplicáveis ao trabalho, de forma individual.

Sociedades Classificadoras	Número da Norma	Nome	Data	WPS		WAPS	Aparelhos de Força	Estrutura Geral	Doc. técnica
				Tallships	Iates				
	DNVGL-ST-0377	Standard for shipboard lifting appliances	mai/16						
	DNVGL-ST-0411	Tall ship rigs	out/16						
	DNVGL-ST-0412	Design and construction of large modern yacht rigs	dez/16						
	DNVGL-ST-0511	Wind assisted propulsion systems	nov/19						
	DNVGL-CG-0550	Maritime services	jul/19						
	NR 206 DT R01 E	Wind propulsion systems	fev/21						
	NR 646 DT R00 E	Structural assessment of steel ships	set/19						
	NR 526 DT R03 E	Lifting appliances onboard ships and offshore units	jul/21						
	NR 608 DT R00 E	Classification of lifting units	jan/15						
	-	Certification of masts, spars and standing rigging	jul/16						
	-	Sail assisted ships	jul/21						
	-	Lifting appliances in a marine environment	ago/13						
	-	Wind assisted propulsion systems installation	jun/20						
	-	Certification of lifting appliances	dez/21						

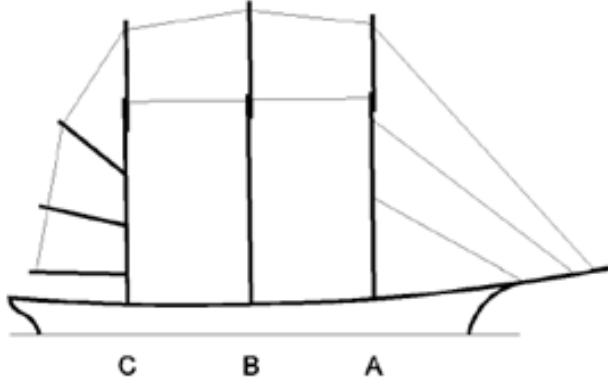
FIGURA E.1: Normas das principais sociedades classificadoras.

E.1 DNVGL-ST-0411 - Tall Ship Rigs

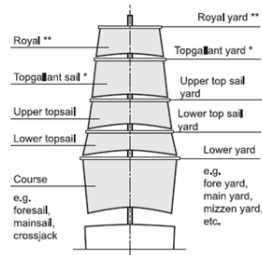
Como foi referido, esta norma inicia-se com as definições gerais sobre os navios à vela e o seu aparelho vélico. As velas são classificadas em dois grupos distintos tendo em conta a sua geometria. Existindo as velas redondas (*square sails*), que envergam em vergas (*yards*) e velas triangulares (*fore-and-aft sails*), que são içadas nos estais (*stays*). A classificação dos veleiros têm por base o tipo de velas que constitui o seu aparelho vélico e o número de mastros que possui. Considerando que o N. E. “Sagres” possui ambos os tipos de velas e que conta com três mastros é classificado como uma barca (*bark*).

A nomenclatura aplicada aos mastros, vergas e velame para veleiros como as barcas, encontra-se na seguinte tabela (Tabela E.1), onde se verifica a comparação da nomenclatura utilizada pelas normas internacionais e pela Marinha Portuguesa.

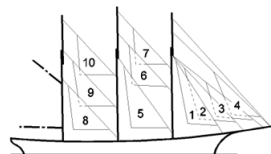
TABELA E.1: Nomenclatura do aparelho vélico e a equivalência para a Marinha Portuguesa

DNV-GL		Marinha Portuguesa (NE Sagres)
Tipos de Velas		
Square rig (carry yards)		Velas Redondas (com vergas)
Fore-and-aft rig (carry no yards)		Velas Latinas (sem vergas)
Mastros (Masts)		
		
A	Foremast	Traquete
B	Mainmast	Grande
C	Mizzenmast	Mezena

Velas Redondas e Triangulares (Square Sails and Stay Sails)



Coursrse	Grande/Traquete
Lower Yard	Grande/Traquete (verga)
Lower Topsail	Gávea Baixa/Velacho Baixo
Lower Topsail Yard	Gávea Baixa/Velacho Baixo (verga)
Upper Topsail	Gávea Alta/Velacho Alto
Upper Topsail Yard	Gávea Alta/Velacho Alto (verga)
Topgallant Sail	Joanete
Topgallant Sail Yard	Joanete (verga)
Royal	Sobre
Royal Yard	Sobre (verga)



1	Fore Top Mast Stay Sail	Vela de Estai
2	Inner Jib Stay	Bujarrona de Fora
3	Outer Jib Stay	Bujarrona de Dentro
4	Flying Jib	Giba
5	Main Top Mast Stay Sail	Estai da Gávea
6	Main Top Gallant Stay Sail	Estai do Joanete
7	Main Royal Stay Sail	Estai do Galope do Grande
8	Mizzen Stay Sail	Estai da Mezena
9	Mizzen Topmast Stay Sail	Estai do Gave-Tope
10	Mizzen Topgallant Saty Sail	Estai do Galope do Gave-Tope

Apêndice F - Manobras Correspondentes a cada Aparelho de Força

TABELA F.1: Manobras correspondentes a cada aparelho de força

Aparelho	Manobras Correspondentes	Código Cabo
B1	Ostaga Velacho Alto	T53
	Adriça Bujarrona de Dentro	G13
	Adriça da Giba	G14
	Ostaga do Sobre de Proa	T54
E1	Adriça do Estai do Velacho	G15
	Adriça da Bujarrona de Fora	G16
	Ostaga do Joanete de Proa	T55
B2 / E2	Escotas do Traquete	T56/57
	Amuras do Grande	B1/2
	Braços do Traquete	T58 a T63
B3	Adriça do Estai da Gávea	B65
	Braço do Joanete de Proa	B66
	Braço do Sobre de Proa	B67
	Patarrás do Turco	B68
	Ostaga do Joanete	B69
	Adriça do Estai do Galope do Grande	B70
E3	Ostaga da Gávea Alta	B58
	Braço do Joanete de Proa	B59
	Braço do Sobre de Proa	B61
	Adriça do Estai do Joanete	B63
	Ostaga do Sobre	B64
B4 / E4	Braços do Grande	M34 a 39
	Contra Burros	M16/M18

Apêndice G - Simulação CFD

G.1 Modelação da Geometria das Velas em *Solidworks*



FIGURA G.1: Vela rígida bidimensional numa projeção frontal, modelada em *Solidworks*.

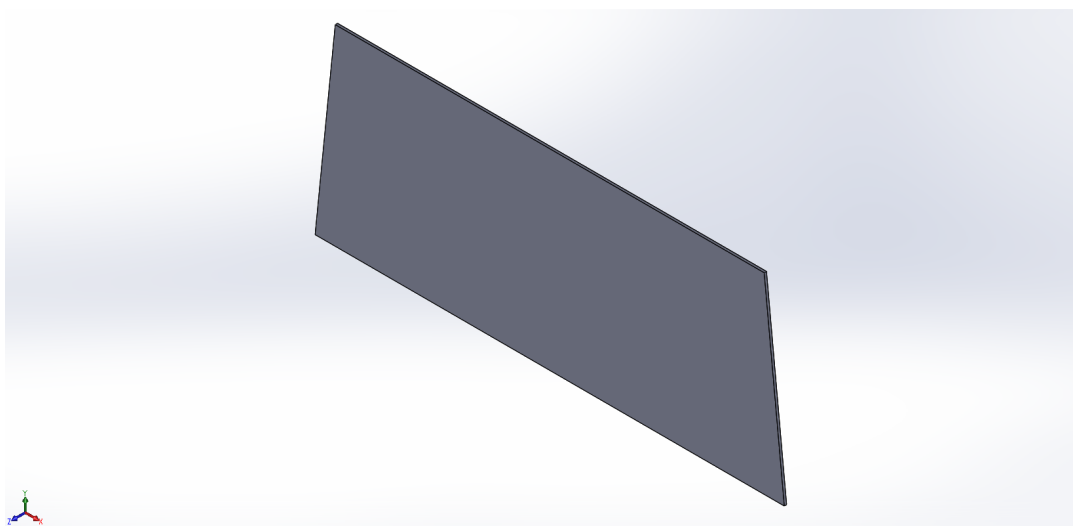


FIGURA G.2: Vela rígida bidimensional numa projeção isométrica, modelada em *Solidworks*.



FIGURA G.3: Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo horizontal) numa projeção frontal, modelada em *Solidworks*.

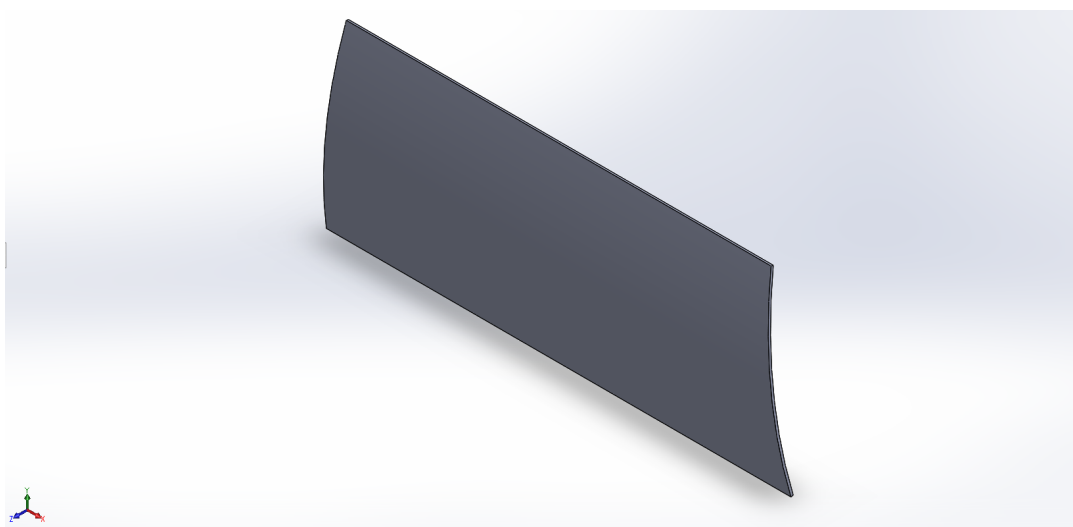


FIGURA G.4: Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo horizontal) numa projeção isométrica, modelada em *Solidworks*.



FIGURA G.5: Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo horizontal) numa projeção frontal, modelada em *Solidworks*.

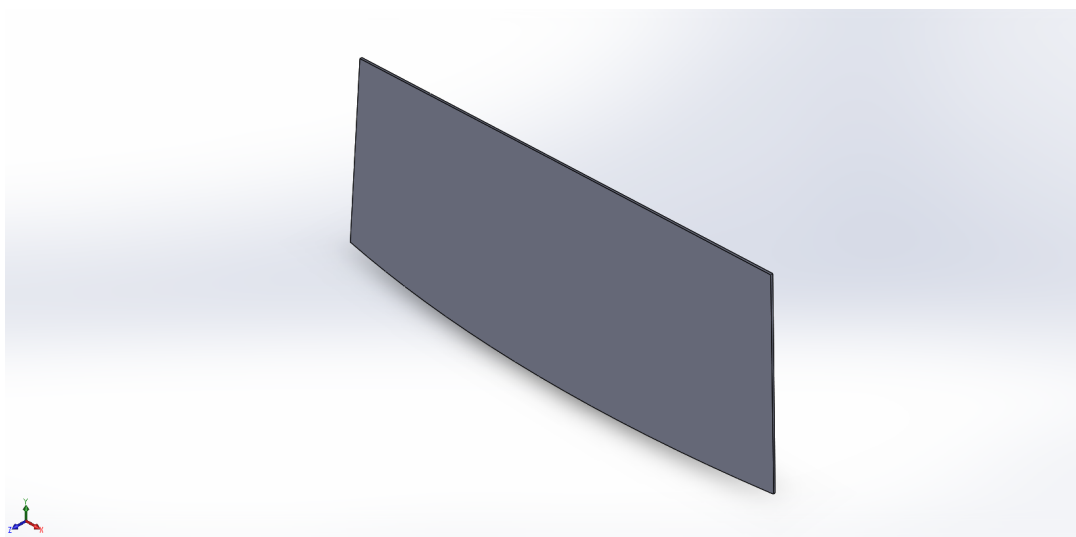


FIGURA G.6: Vela rígida tridimensional (curvatura sobre o eixo vertical) numa projeção isométrica, modelada em *Solidworks*.

G.2 Coeficiente de Arrasto

TABELA G.1: Coeficiente de arrasto para a vela grande, obtido através da simulação CFD para diferentes velocidades e posições da verga

θ_i	V [m/s]	VR_2D [N]	VR_3D_VER [N]	VR_3D_HOR [N]
0°	15	1,411	1,393	1,452
	20	1,411	1,394	1,452
	25	1,410	1,402	1,452
	50	1,410	1,396	1,452
17°	15	1,369	1,350	1,395
	20	1,350	1,337	1,375
	25	1,335	1,333	1,367
	50	1,322	1,327	1,355
28°	15	1,375	1,383	1,388
	20	1,353	1,362	1,365
	25	1,328	1,346	1,348
	50	1,287	1,300	1,300
45°	15	1,438	1,448	1,445
	20	1,437	1,447	1,444
	25	1,436	1,445	1,443
	50	1,435	1,437	1,440
62°	15	0,967	0,989	0,963
	20	0,967	0,988	0,963
	25	0,967	0,988	0,963
	50	0,966	0,987	0,962

G.3 Características do Escoamento Externo na Superfície da Vela e Distribuição de Pressões

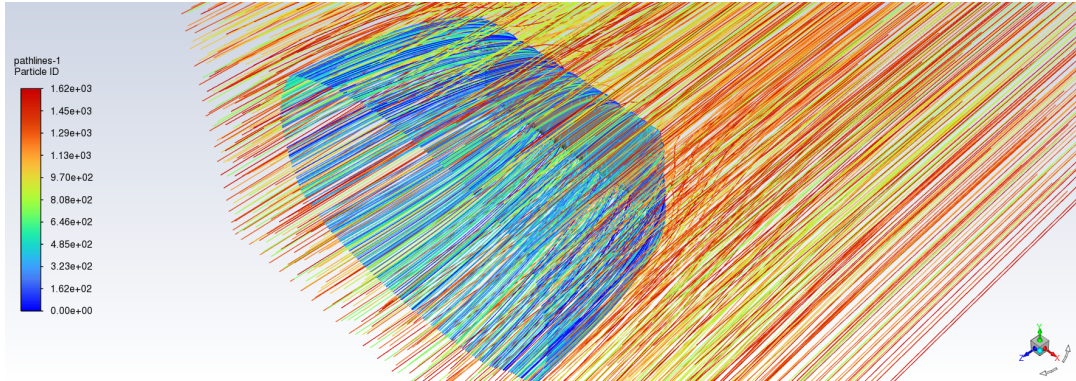


FIGURA G.7: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (projeção ortogonal).

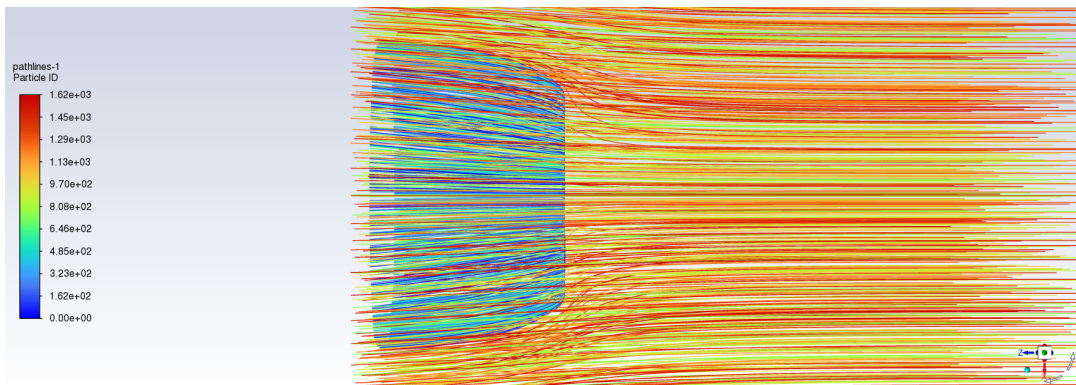


FIGURA G.8: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (projeção vertical).

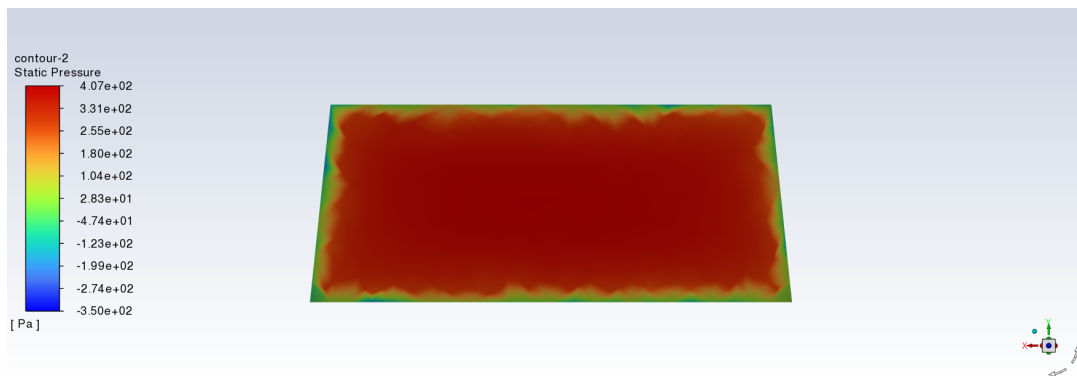


FIGURA G.9: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (bordo de ataque).

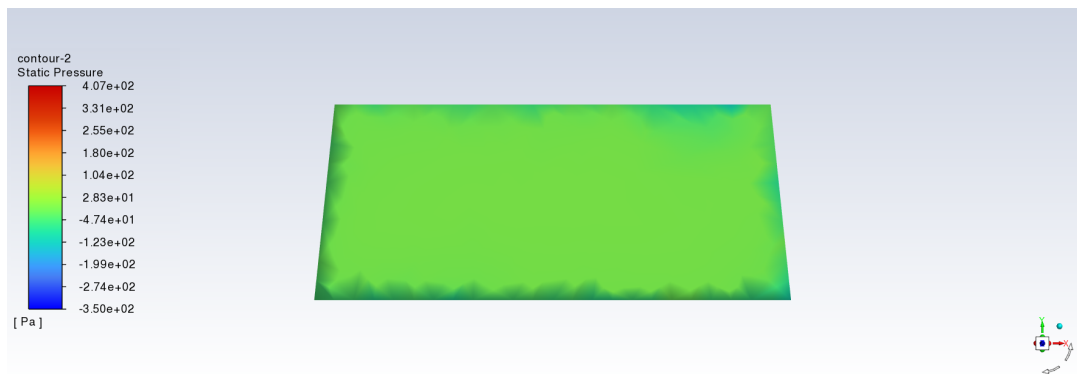


FIGURA G.10: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional numa posição perpendicular a este (bordo contrário).

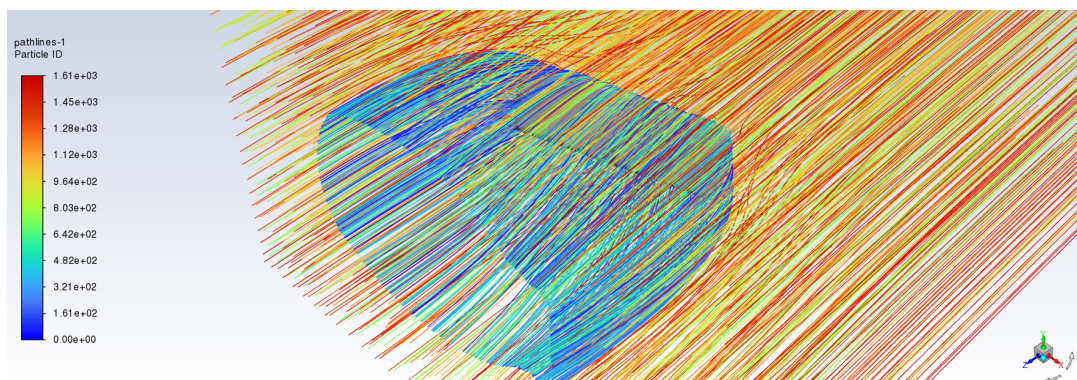


FIGURA G.11: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 17° (projecção ortogonal).

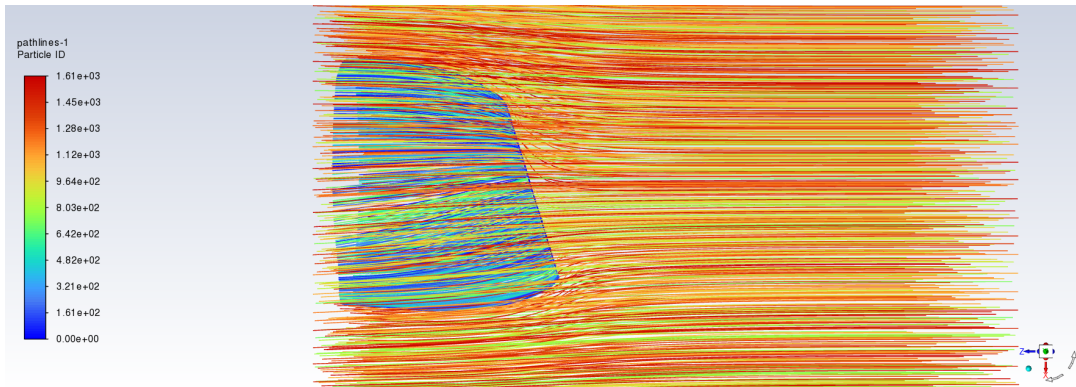


FIGURA G.12: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 17° (projeção vertical).

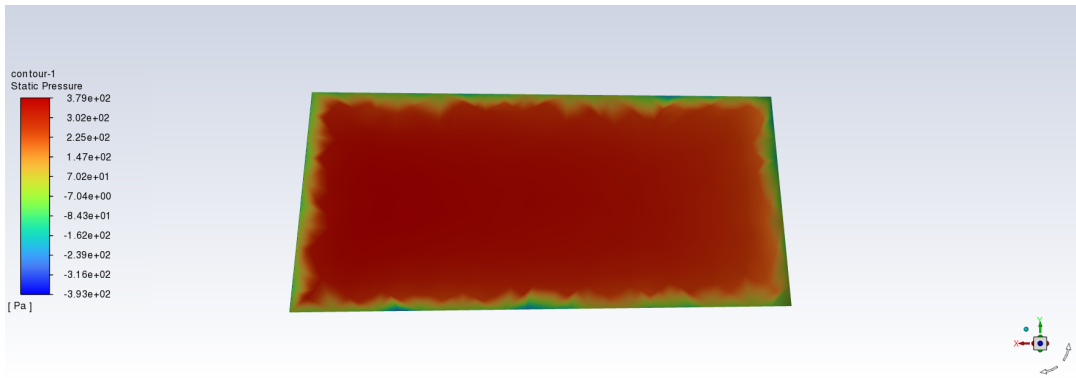


FIGURA G.13: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 17° (bordo de ataque).

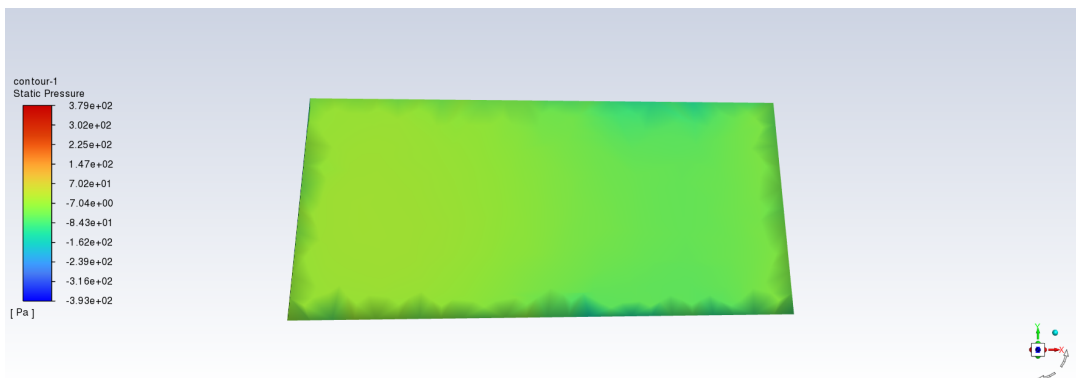


FIGURA G.14: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 17° (bordo contrário).

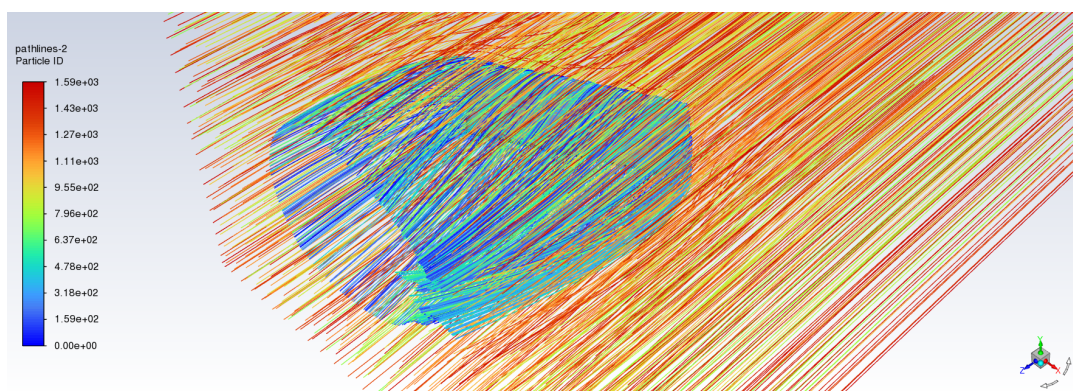


FIGURA G.15: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 28° (projeção ortogonal).

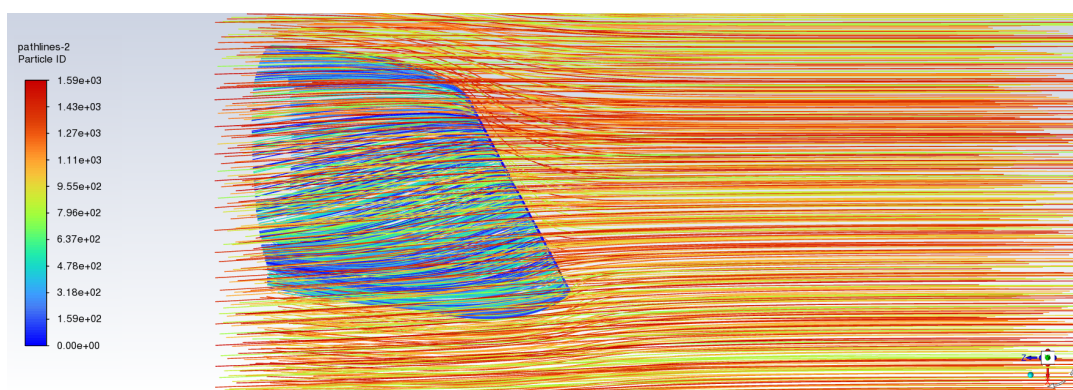


FIGURA G.16: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 28° (projeção vertical).

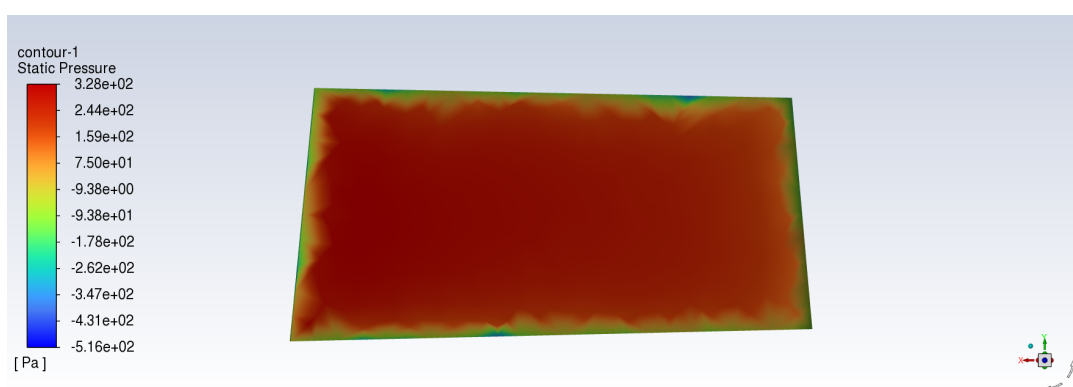


FIGURA G.17: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 28° (bordo de ataque).

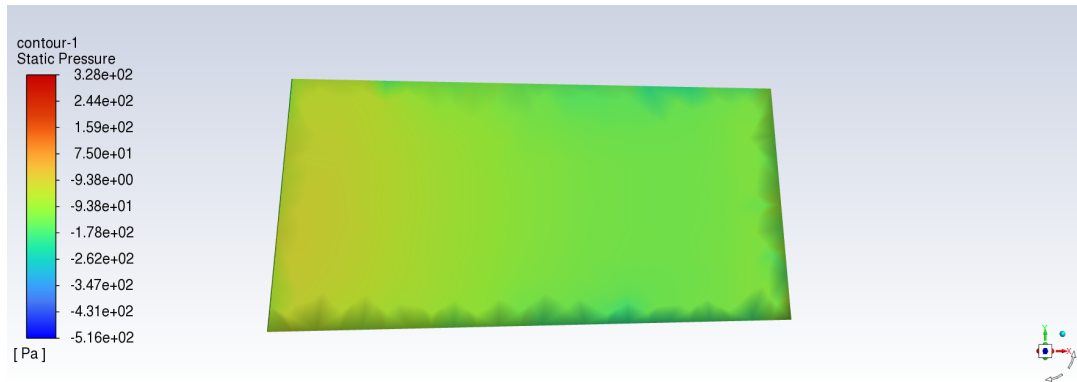


FIGURA G.18: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 28° (bordo contrário).

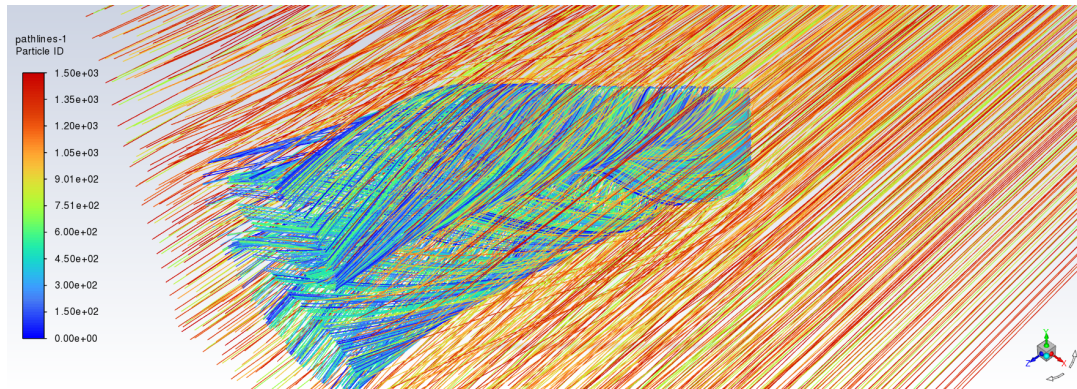


FIGURA G.19: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 45° (projeção ortogonal).

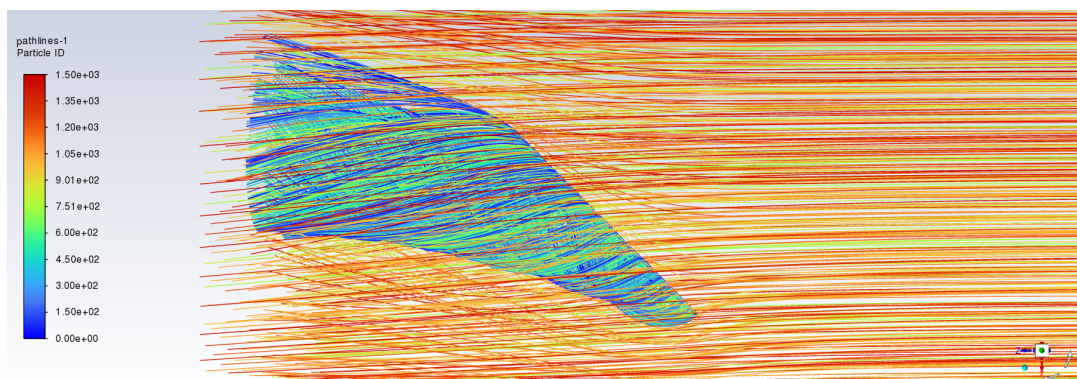


FIGURA G.20: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 45° (projeção vertical).

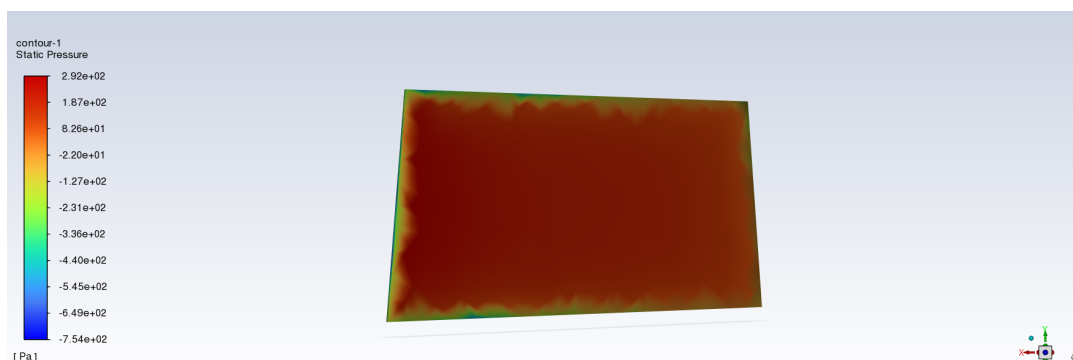


FIGURA G.21: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 45° (bordo de ataque).

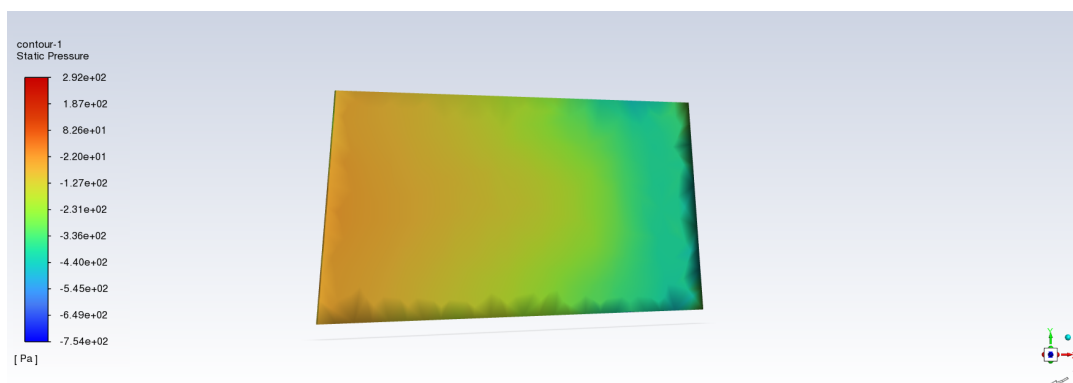


FIGURA G.22: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 45° (bordo contrário).

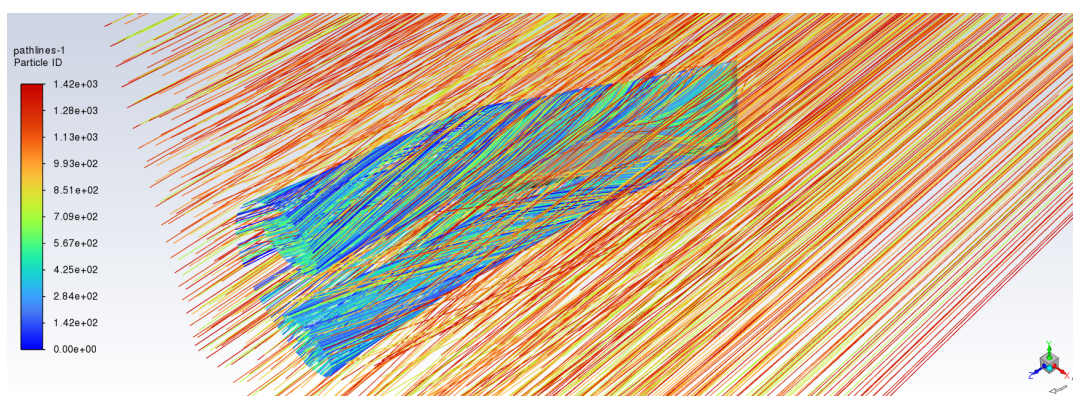


FIGURA G.23: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 62° (projecção ortogonal).

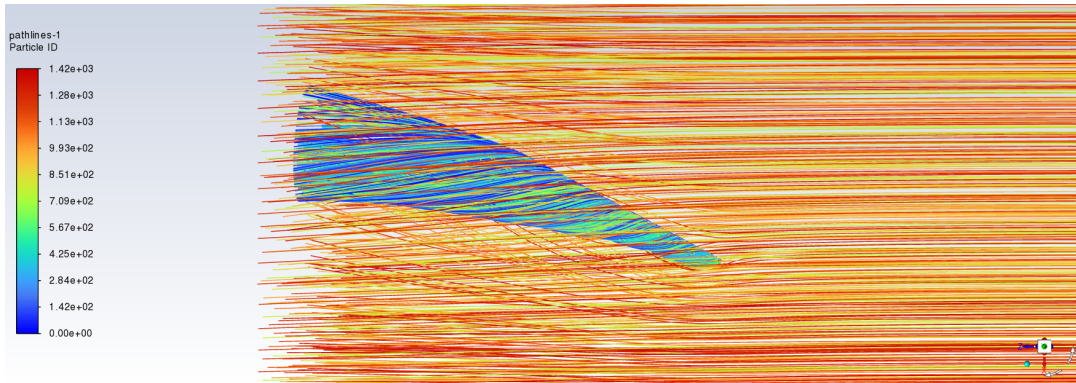


FIGURA G.24: Características do escoamento numa vela rígida bidimensional a 62° (projeção vertical).

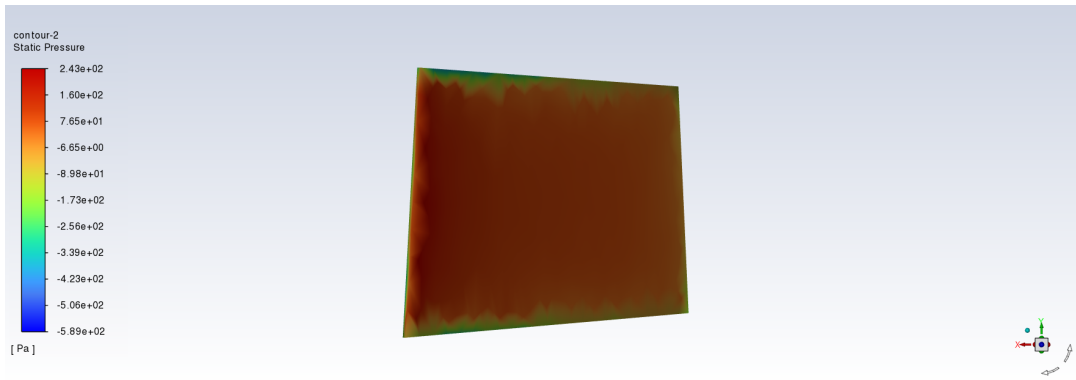


FIGURA G.25: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 62° (bordo de ataque).

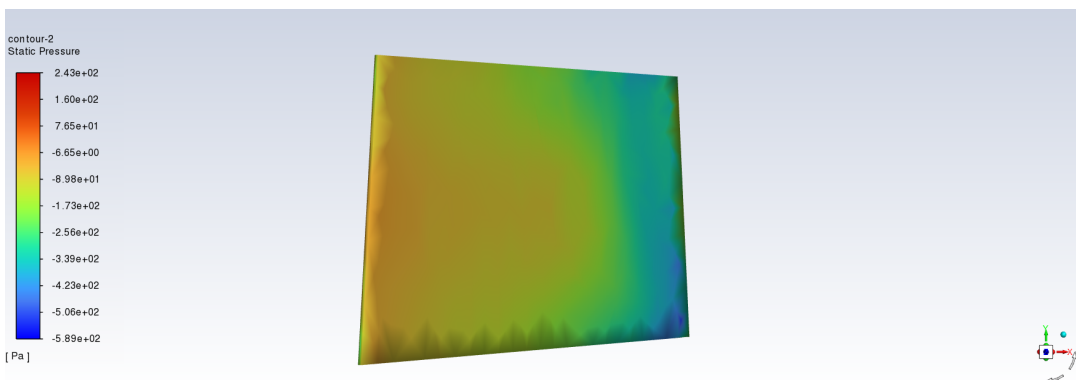


FIGURA G.26: Distribuição de pressões numa vela rígida bidimensional a 62° (bordo contrário).

Apêndice H - Método Experimental

H.0.1 Geometria Diferentes das Velas para os Ensaios Experimentais

As geometrias das velas construídas para os ensaios experimentais têm por base as utilizadas na análise através da simulação CFD, acrescentado uma vela tridimensional flexível. Nas próximas figuras é possível observar as características físicas de cada um dos modelos concebidos para o efeito.



FIGURA H.1: Modelo de uma vela rígida bidimensional numa vista frontal.



FIGURA H.2: Modelo de uma vela rígida bidimensional numa vista posterior.

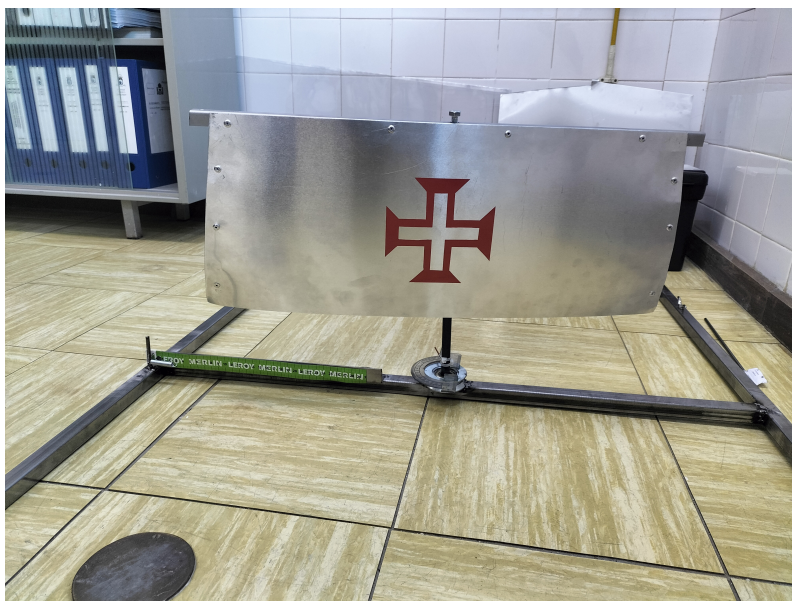


FIGURA H.3: Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal) numa vista frontal.



FIGURA H.4: Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal) numa vista posterior.



FIGURA H.5: Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo Vertical) numa vista frontal.



FIGURA H.6: Modelo de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo Vertical) numa vista posterior.

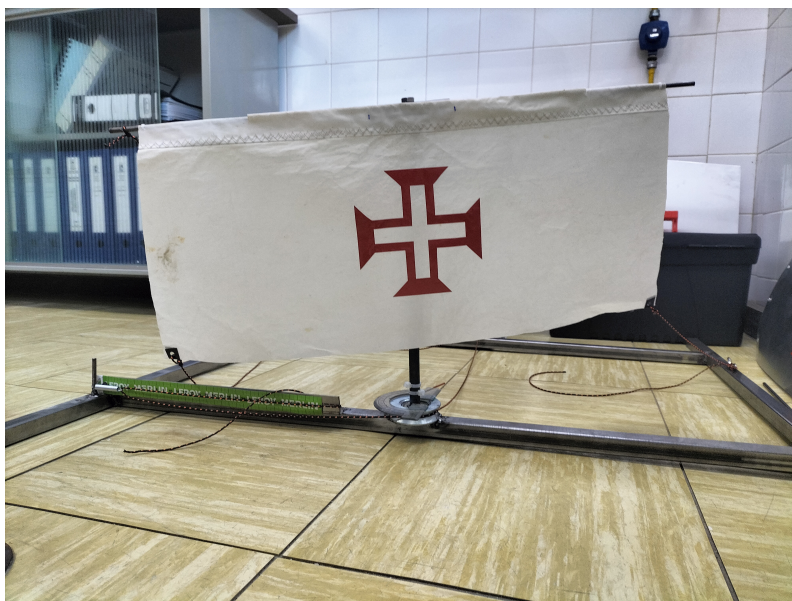


FIGURA H.7: Modelo de uma vela flexível tridimensional numa vista frontal.



FIGURA H.8: Modelo de uma vela flexível tridimensional numa vista posterior.

H.0.2 Calibração do Sistema de medição de forças

A medição das forças nas várias situações correspondentes a cada ensaio foi feita através de uma mola sobre uma escala em milímetros, ou seja, com um funcionamento idêntico a um dinamômetro. A mola é atuada diretamente através do cabo que fixa a verga numa posição definida inicialmente. A força aplicada à mola e a extensão obtida podem ser relacionadas através da seguinte equação:

$$F_{mola} = K \cdot l \quad [N] \quad (H.1)$$

Em que k representa a constante de elasticidade da mola e l a extensão resultante da força aplicada.

Para determinar a constante de elasticidade da mola utilizada nos ensaios, com um comprimento inicial de 10 cm, realizaram-se 5 ensaios com a aplicação de forças conhecidas.

TABELA H.1: Determinação da constante de elasticidade da mola utilizada para medição das forças nos ensaios experimentais

Ensaio	Massa [kg]	Extensão total [cm]	l [m]	K
1	0,1	14	0,04	24,500
2	0,2	19,9	0,099	19,798
3	0,3	24,2	0,142	20,704
4	0,4	29,3	0,193	20,311
5	0,5	34,9	0,249	19,679

Dos ensaios apresentados na Tabela H.1 obteve-se um valor médio da constante de elasticidade da mola de 21.

Integrado na calibração do sistema, foi determinado o atrito do equipamento. Este atrito é essencialmente devido ao sistema de roldanas que por um lado permite manter a relação dos ângulos dos cabos com as vergas, e por outro lado permite que o final do cabo esteja junto à zona onde foi instalada a mola próxima da escala. Para a medição do atrito, recorreu-se ao equipamento utilizado nos ensaios, e aplicou-se uma massa conhecida por forma a ser possível determinar com precisão a força aplicada na verga. Os ensaios foram realizados para três massas distintas onde a força foi medida em dois locais distintos para permitir a comparação: após todo o sistema de roldanas (como nos ensaios em túnel de vento) e com uma mola instalada diretamente na verga.

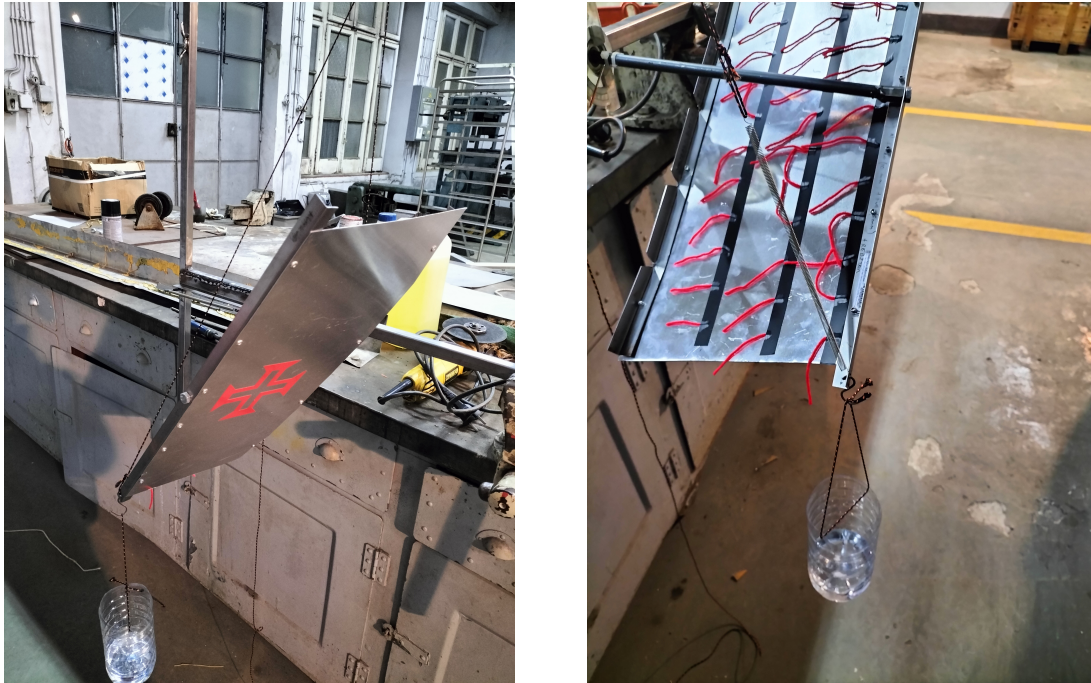


FIGURA H.9: Procedimento de determinação do atrito associado ao equipamento de ensaios experimentais

Na Tabela H.2 é possível verificar os resultados obtidos dos diferentes ensaios para determinação da força de atrito. A força aplicada foi obtida por massas conhecidas, a partir da qual se obteve o valor da extensão esperada ($l_{esperada}$), resultado da aplicação da equação H.1. A extensão sem atrito ($l_{s\backslash atrito}$) foi medida diretamente na verga, e o seu valor é inferior à extensão esperada devido ao ângulo de aplicação das forças. A extensão com atrito ($l_{c\backslash atrito}$) foi obtida na mola de forma idêntica aos ensaios no túnel aerodinâmico, em que o cabo passa por todo o sistema de roldanas.

TABELA H.2: Procedimento de determinação do atrito associado ao equipamento de ensaios experimentais

Força Aplicada[N]	$l_{esperada}[cm]$	$l_{s\backslash atrito}[cm]$	$l_{c\backslash atrito}[cm]$	Atrito [%]
0,49	2,3	0,5	0,0	100,0
0,98	4,7	3,2	1,5	53,1
1,96	9,3	10,4	7,2	30,8

Dos resultados obtidos, verifica-se que o sistema não é sensível para forças aplicadas inferiores a 0,5 N. E que o fator de atrito diminui com o aumento da força aplicada.

H.0.3 Registos das Forças durante os Ensaios Experimentais

TABELA H.3: Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida bidimensional

Vela 2D Rígida				
θ_i	V [m/s]	E ₁ [cm]	E ₂ [cm]	Média [cm]
0°	6,5	10,0	10,0	10,0
	8	10,1	10,2	10,2
	10	10,7	10,9	10,8
17°	6,5	10,3	10,6	10,5
	8	11,5	12,0	11,8
	10	13,1	12,9	13,0
28°	6,5	10,6	11,1	10,9
	8	11,8	12,8	12,3
	10	13,8	14,6	14,2
45°	6,5	11,3	11,9	11,6
	8	12,6	13,6	13,1
	10	15,0	15,9	15,5
62°	6,5	12,6	13,0	12,8
	8	13,7	14,8	14,3
	10	15,7	17,0	16,4

TABELA H.4: Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida tridimensional (curvatura eixo vertical)

Vela 3D Rígida (curvatura eixo vertical)				
θ_i	V [m/s]	E ₁ [cm]	E ₂ [cm]	Média [cm]
0°	6,5	10,0	10,0	10,0
	8	10,0	10,0	10,0
	10	10,0	10,0	10,0
17°	6,5	10,1	10,1	10,1
	8	10,4	10,6	10,5
	10	11,4	11,5	11,5
28°	6,5	10,2	10,4	10,3
	8	11,1	11,9	11,5
	10	12,8	12,8	12,8
45°	6,5	10,9	11,1	11,0
	8	11,8	12,8	12,3
	10	13,7	14,5	14,1
62°	6,5	12,8	12,6	12,7
	8	13,5	13,7	13,6
	10	14,4	15,3	14,9

TABELA H.5: Registos das extensões da mola do modelo da vela rígida tridimensional (curvatura eixo horizontal)

Vela 3D Rígida (curvatura eixo horizontal)				
θ_i	V [m/s]	E ₁ [cm]	E ₂ [cm]	Média [cm]
0°	6,5	10,0	10,0	10,0
	8	10,0	10,0	10,0
	10	10,1	10,1	10,1
17°	6,5	10,2	10,0	10,1
	8	10,5	10,3	10,4
	10	11,1	11,2	11,2
28°	6,5	10,2	10,1	10,2
	8	10,8	10,9	10,9
	10	12,0	12,1	12,1
45°	6,5	11,3	10,6	11,0
	8	12,0	11,6	11,8
	10	12,7	13,0	12,9
62°	6,5	13,0	12,4	12,7
	8	13,6	13,0	13,3
	10	14,3	13,8	14,1

TABELA H.6: Registos das extensões da mola do modelo da vela flexível

Vela flexível		
θ_i	V [m/s]	$E_1[cm]$
0°	6,5	10,0
	8	10,0
	10	10,2
17°	6,5	10,8
	8	11,3
	10	11,5
28°	6,5	10,5
	8	11,8
	10	13,4
45°	6,5	11,4
	8	12,5
	10	13,6
62°	6,5	11,6
	8	13,2
	10	15,1

H.0.4 Características do Escoamento

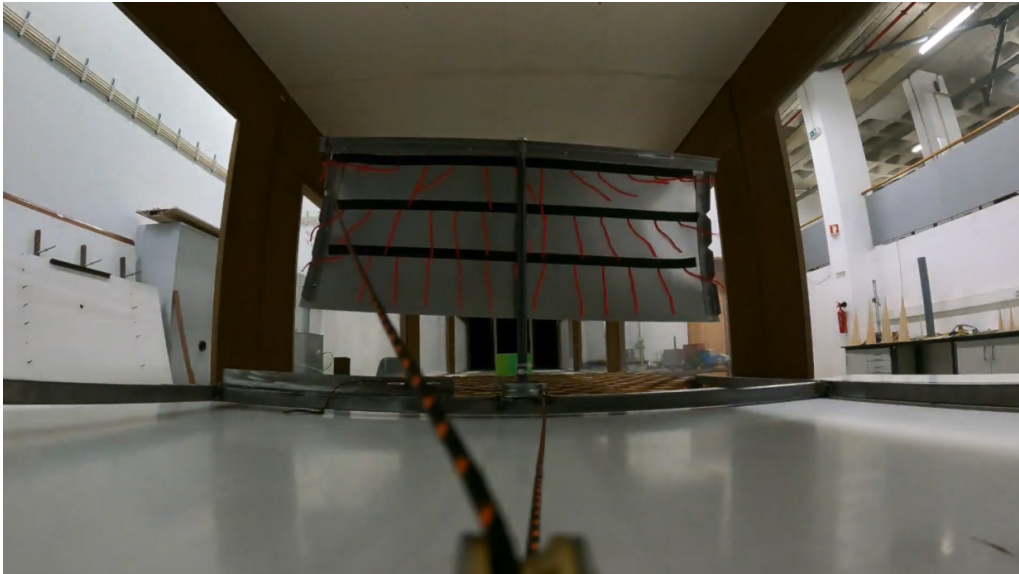


FIGURA H.10: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) numa posição perpendicular ao escoamento.

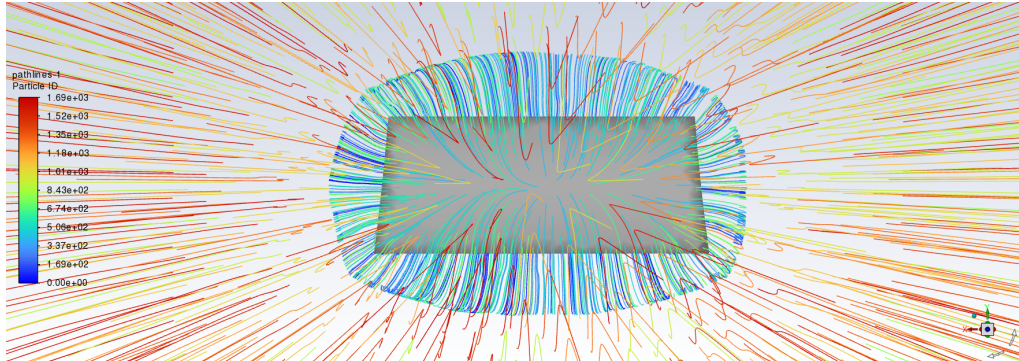


FIGURA H.11: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) numa posição perpendicular ao escoamento.

H.0.5 Processamento dos Resultados dos Ensaios

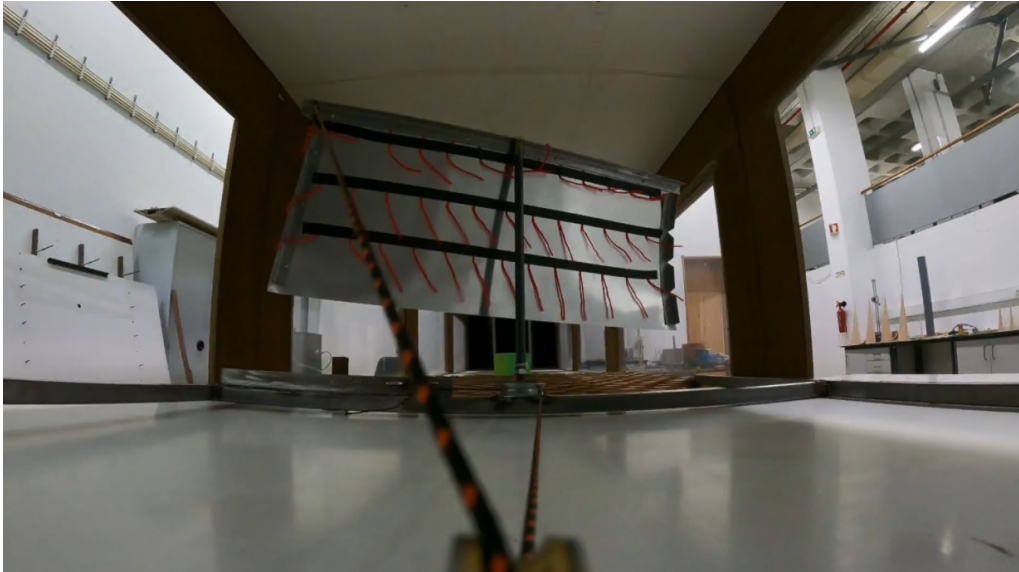


FIGURA H.12: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 17 graus da perpendicular ao escoamento.

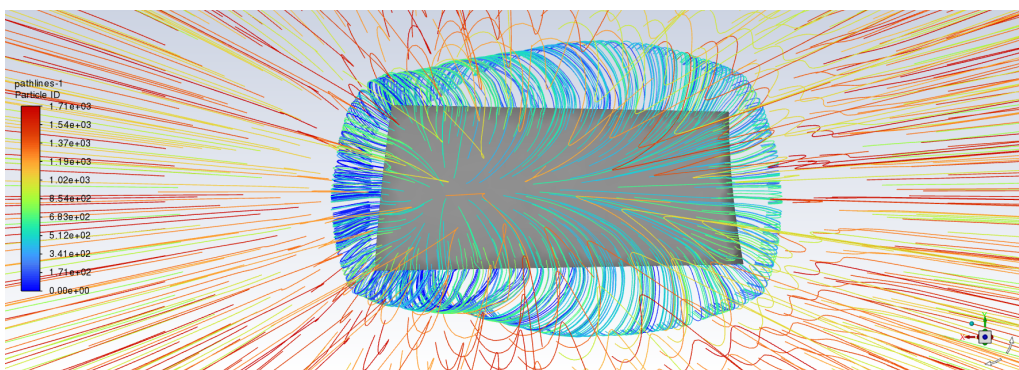


FIGURA H.13: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 17 graus da perpendicular ao escoamento.

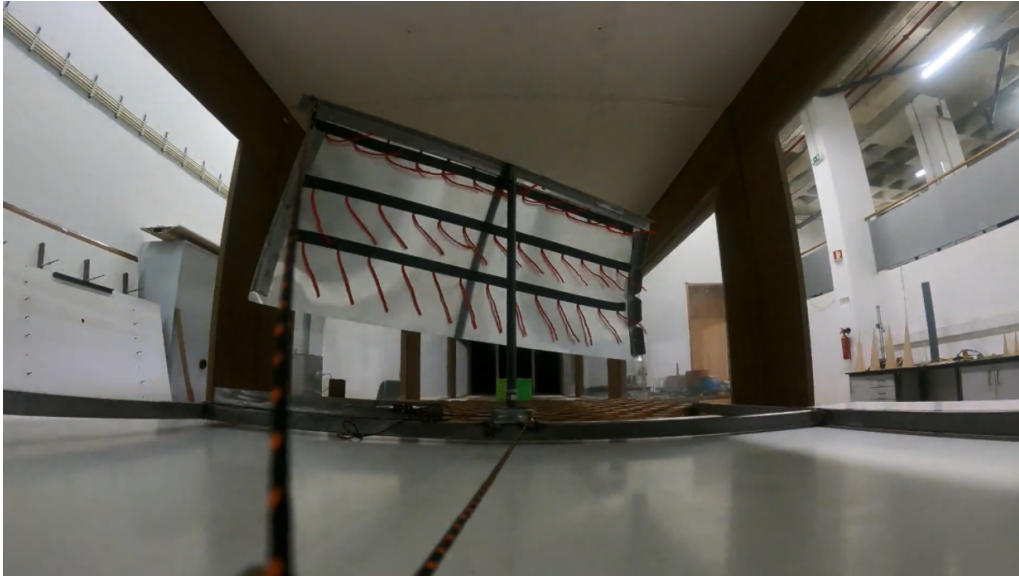


FIGURA H.14: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 28 graus da perpendicular ao escoamento.

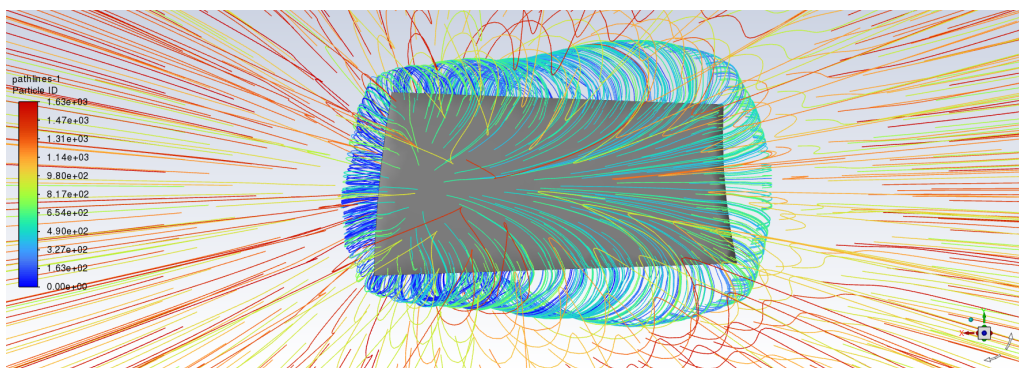


FIGURA H.15: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 28 graus da perpendicular ao escoamento.

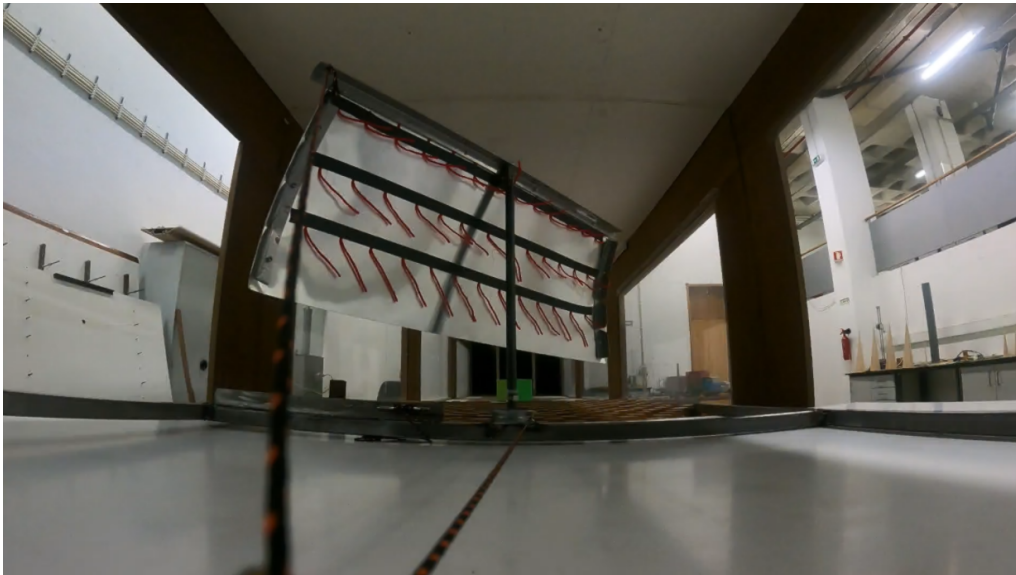


FIGURA H.16: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 45 graus da perpendicular ao escoamento.

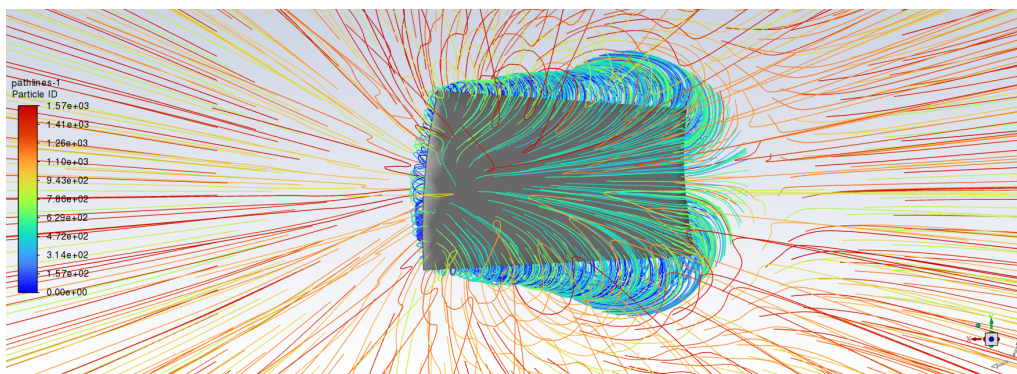


FIGURA H.17: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 45 graus da perpendicular ao escoamento.

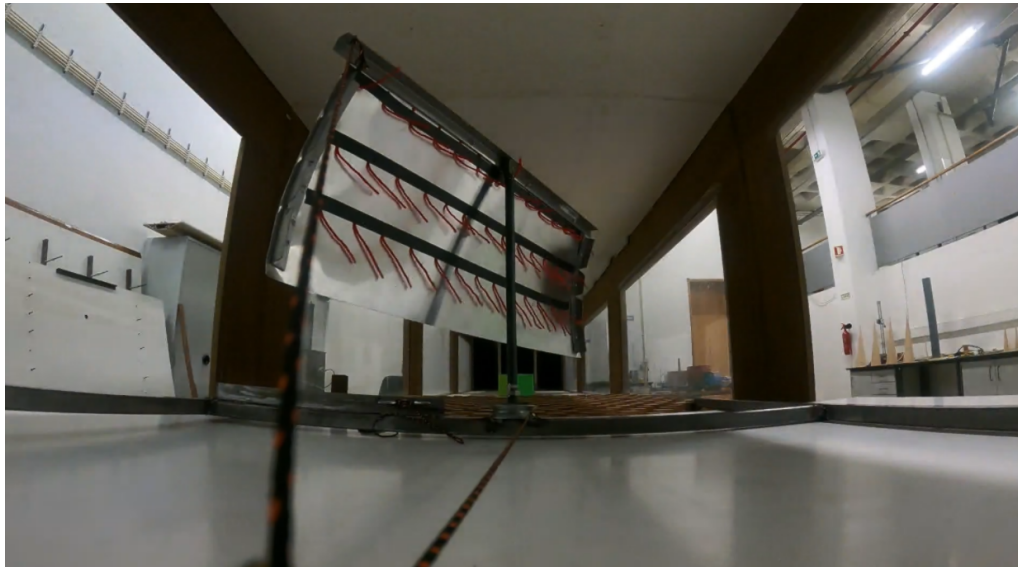


FIGURA H.18: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) observada nos ensaios experimentais (8 m/s) a 62 graus da perpendicular ao escoamento.

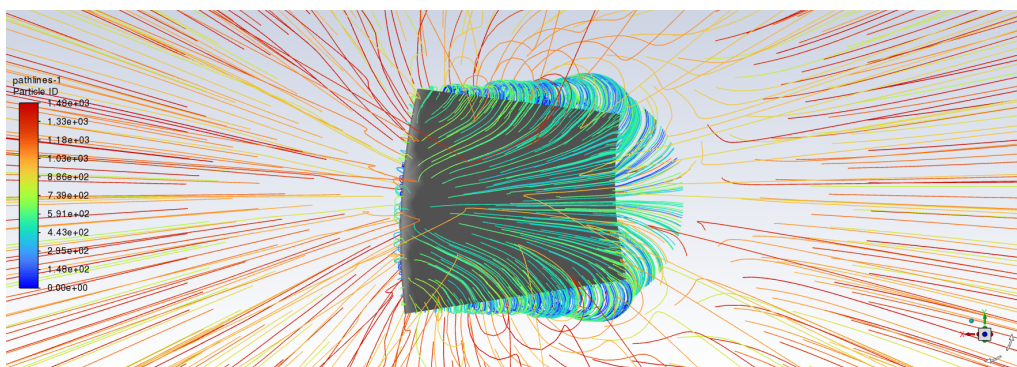


FIGURA H.19: Características do escoamento externo numa vela tri-dimensional (curvatura no eixo horizontal) obtido através da simulação CFD (20 m/s) a 62 graus da perpendicular ao escoamento.

TABELA H.7: Cálculo das forças aerodinâmicas e respectivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida bidimensional

Vela 2D Rígida					
θ_i	V [m/s]	$l_{média}$ [cm]	F_{cabo} [N]	F_{verga} [N]	M_{verga} [Nm]
0°	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,15	0,05	0,04	0,01
	10	0,80	0,25	0,24	0,06
17°	6,5	0,45	0,14	0,14	0,04
	8	1,75	0,55	0,54	0,15
	10	3,00	0,95	0,93	0,25
28°	6,5	0,85	0,27	0,25	0,07
	8	2,30	0,72	0,68	0,18
	10	4,20	1,32	1,25	0,34
45°	6,5	1,60	0,50	0,40	0,11
	8	3,10	0,98	0,77	0,21
	10	5,45	1,72	1,35	0,37
62°	6,5	2,80	0,88	0,48	0,13
	8	4,25	1,34	0,73	0,20
	10	6,35	2,00	1,09	0,29

TABELA H.8: Cálculo das forças aerodinâmicas e respectivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo vertical)

Vela 3D Rígida (curvatura no eixo vertical)					
θ_i	V [m/s]	$l_{média}$ [cm]	F_{cabo} [N]	F_{verga} [N]	M_{verga} [Nm]
0°	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00
17°	6,5	0,10	0,03	0,03	0,01
	8	0,50	0,16	0,16	0,04
	10	1,45	0,46	0,45	0,12
28°	6,5	0,30	0,09	0,09	0,02
	8	1,50	0,47	0,45	0,12
	10	2,80	0,88	0,83	0,22
45°	6,5	1,00	0,32	0,25	0,07
	8	2,30	0,72	0,57	0,15
	10	4,10	1,29	1,02	0,27
62°	6,5	2,70	0,85	0,46	0,12
	8	3,60	1,13	0,62	0,17
	10	4,85	1,53	0,83	0,22

TABELA H.9: Cálculo das forças aerodinâmicas e respectivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela rígida tridimensional (curvatura no eixo horizontal)

Vela 3D Rígida (curvatura no eixo horizontal)					
θ_i	V [m/s]	$l_{média}$ [cm]	F_{cabo} [N]	F_{verga} [N]	M_{verga} [Nm]
0°	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,10	0,03	0,03	0,01
17°	6,5	0,10	0,03	0,03	0,01
	8	0,40	0,13	0,12	0,03
	10	1,15	0,36	0,36	0,10
28°	6,5	0,15	0,05	0,04	0,01
	8	0,85	0,27	0,25	0,07
	10	2,05	0,65	0,61	0,16
45°	6,5	0,95	0,30	0,24	0,06
	8	1,80	0,57	0,45	0,12
	10	2,85	0,90	0,71	0,19
62°	6,5	2,70	0,85	0,46	0,12
	8	3,30	1,04	0,56	0,15
	10	4,05	1,28	0,69	0,19

TABELA H.10: Cálculo das forças aerodinâmicas e respectivos coeficiente a partir dos ensaios experimentais de uma vela flexível tridimensional

Vela 3D Flexível					
θ_i	V [m/s]	$l_{média}$ [cm]	F_{cabo} [N]	F_{verga} [N]	M_{verga} [Nm]
0°	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,20	0,06	0,06	0,02
17°	6,5	0,80	0,25	0,25	0,07
	8	1,30	0,41	0,40	0,11
	10	1,50	0,47	0,47	0,13
28°	6,5	0,50	0,16	0,15	0,04
	8	1,80	0,57	0,54	0,14
	10	3,40	1,07	1,01	0,27
45°	6,5	1,40	0,44	0,35	0,09
	8	2,50	0,79	0,62	0,17
	10	3,60	1,13	0,89	0,24
62°	6,5	1,60	0,50	0,27	0,07
	8	3,20	1,01	0,55	0,15
	10	5,10	1,61	0,87	0,24

Apêndice I - Aparelhos de Força - Estudo do Mercado

Como foi referido anteriormente, existem três geometria de cabrestantes disponíveis no mercado. Neste apêndice são apresentadas várias soluções de alguns dos fornecedores desta área. Para além das capacidades motores, importa comparar as dimensões dos cabrestantes. Para uma comparação mais simples entre as várias soluções, recorreu-se aos modelos apresentados na seguinte figura.

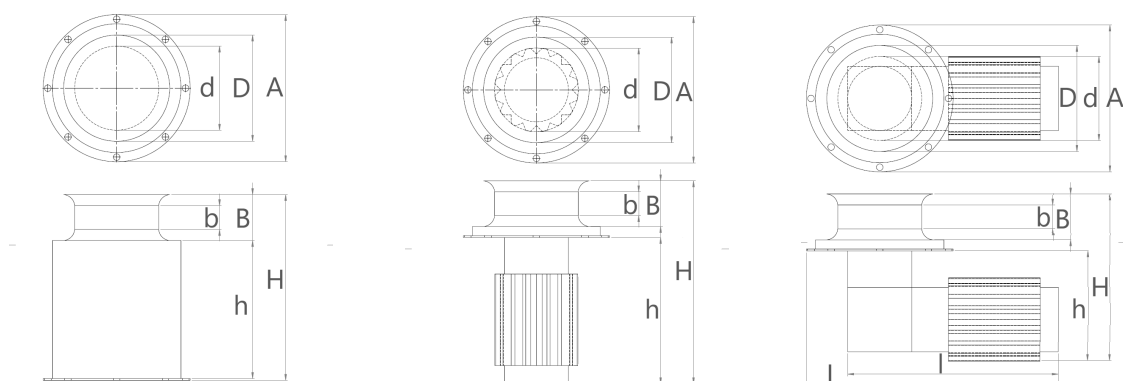
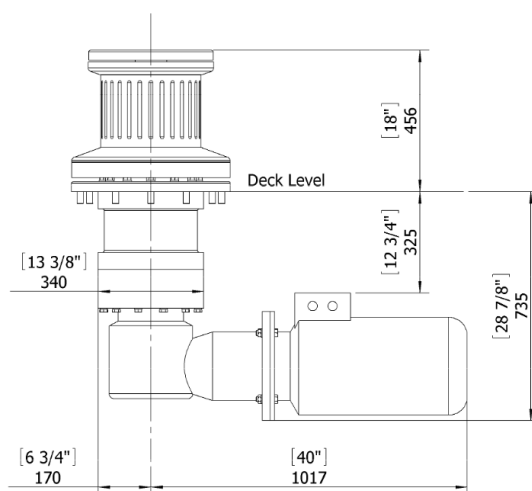


FIGURA I.1: Dimensões principais dos modelos das diferentes geometrias de cabrestantes disponíveis no mercado

As várias soluções foram selecionados de acordo com a capacidade de carga máxima perto dos 10 kN. Deste modo é possível observar que para a mesma carga, dependendo da geometria do aparelho, existem equipamentos mais compactos.

TABELA I.1: Estudo do Mercado - cabrestante MAXWELL VC32

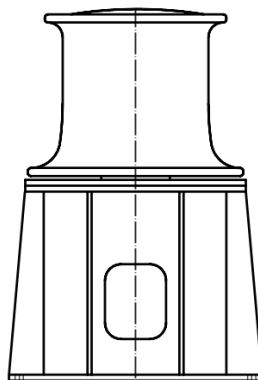
Marca:	MAXWELL	Carga Máxima:	12,7 kN
Modelo:	VC32 Capstan	Potência do Motor:	15 kW
Geometria:	Thru deck - 90	Velocidade de Rotação:	0,2 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 400 V	Diâmetro dos Cabos:	>22 mm



Dimensões [mm]			
D	510	H	1191
d	320	h	735
A	510	L	1272
B	456	l	1187
b	195		

TABELA I.2: Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10

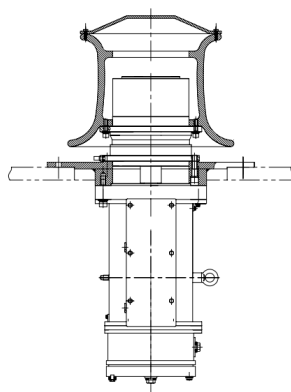
Marca:	UMS	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	GMC - 10	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Above Deck	Velocidade de Rotação:	0,2 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 220/380 V	Diâmetro dos Cabos:	< 47 mm



Dimensões [mm]			
D	470	H	1020
d	250	h	670
A	600	L	-
B	350	l	-
b	-		

TABELA I.3: Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10P

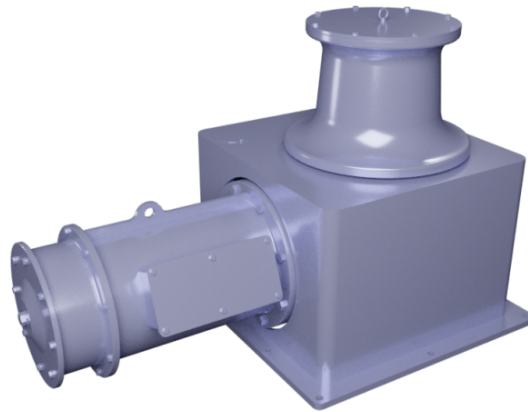
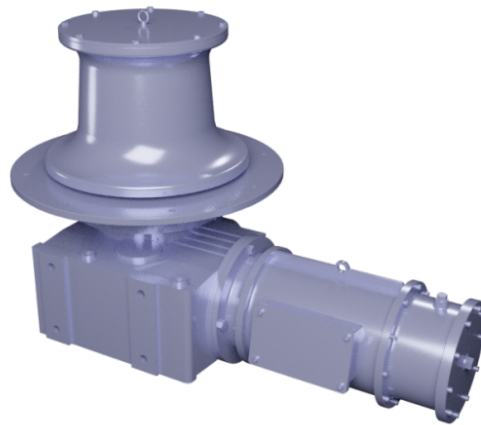
Marca:	UMS	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	GMC - 10P	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Thru Deck - vertical	Velocidade de Rotação:	0,2 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 220/380 V	Diâmetro dos Cabos:	< 47 mm



Dimensões [mm]			
D	470	H	970
d	250	h	604
A	600	L	-
B	366	l	-
b	-		

TABELA I.4: Estudo do Mercado - cabrestante UMS GMC - 10L/NL

Marca:	UMS	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	GMC - 10L/NL	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Thru deck - 90	Velocidade de Rotação:	0,2 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 220/380 V	Diâmetro dos Cabos:	< 47 mm



Dimensões [mm]			
D	470	H	700
d	250	h	380
A	506	L	1025
B	320	l	685
b	-		

TABELA I.5: Estudo do Mercado - cabrestante GLEN ENGINEERING Free Standing Capstan

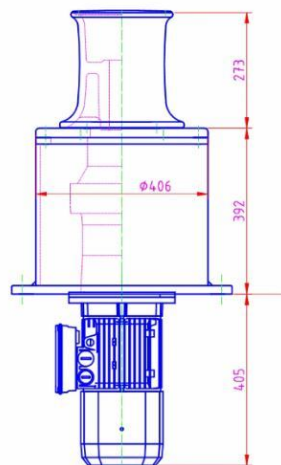
Marca:	GLEN ENGINEERING	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	Free Standing Capst.	Potência do Motor:	5,5 kW
Geometria:	Above Deck	Velocidade de Rotação:	0,3 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico	Diâmetro dos Cabos:	



Dimensões [mm]			
D	-	H	-
d	-	h	-
A	-	L	-
B	-	l	-
b	-		

TABELA I.6: Estudo do Mercado - cabrestante SCAM Marine VPV2-K1H-k

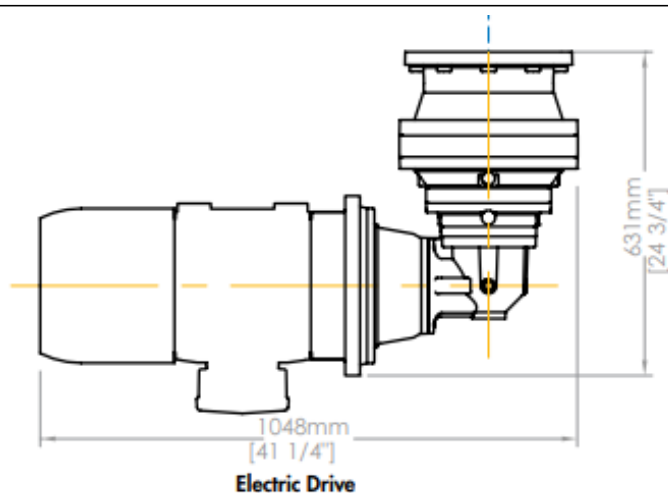
Marca:	SCAM Marine	Carga Máxima:	14 kN
Modelo:	VPV2-K1H-k	Potência do Motor:	
Geometria:	Thru deck - vertical	Velocidade de Rotação:	0,3 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico	Diâmetro dos Cabos:	



Dimensões [mm]			
D	290	H	1070
d	200	h	405
A	406	L	-
B	270	l	-
b	195		

TABELA I.7: Estudo do Mercado - cabrestante MUIR VC22000

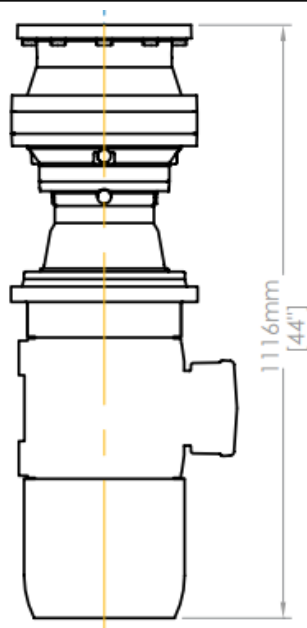
Marca:	MUIR	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	VC22000	Potência do Motor:	11 kW
Geometria:	Thru deck - 90	Velocidade de Rotação:	0,3 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 400 V	Diâmetro dos Cabos:	



Dimensões [mm]			
D	572	H	757
d	400	h	631
A	617	L	1048
B	514	l	1048
b	-		

TABELA I.8: Estudo do Mercado - cabrestante MUIR VC22000

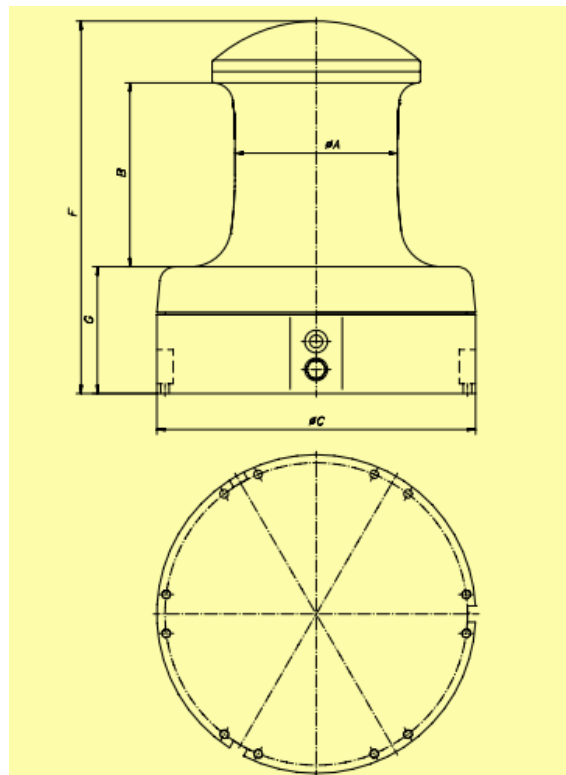
Marca:	MUIR	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	VC22000	Potência do Motor:	11 kW
Geometria:	Thru deck - vertical	Velocidade de Rotação:	0,3 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico - 400 V	Diâmetro dos Cabos:	



Dimensões [mm]			
D	572	H	1630
d	400	h	1116
A	617	L	-
B	514	l	-
b	-		

TABELA I.9: Estudo do Mercado - cabrestante Towimor Mooring Capstan G1A

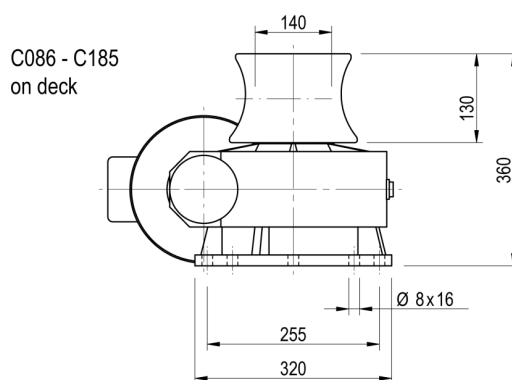
Marca:	Towimor	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	G1A	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Above deck	Velocidade de Rotação:	0,25 m/s
Fonte de Energia:	Elétrico	Diâmetro dos Cabos:	



Dimensões [mm]			
D	500	H	700
d	315	h	0
A	680	L	-
B	400	l	-
b	-		

TABELA I.10: Estudo do Mercado - cabrestante Emcé EMC130E

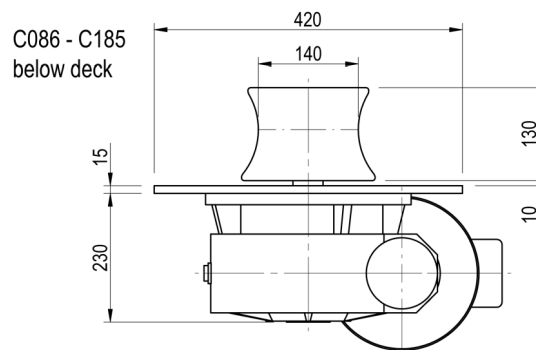
Marca:	Emcé	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	EMC130E	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Above deck	Velocidade de Rotação:	2 velocidades
Fonte de Energia:	Elétrico 400 V	Diâmetro dos Cabos:	22 mm



Dimensões [mm]			
D	-	H	360
d	140	h	230
A	320	L	-
B	130	l	-
b	130		

TABELA I.11: Estudo do Mercado - cabrestante Emcé EMC130E

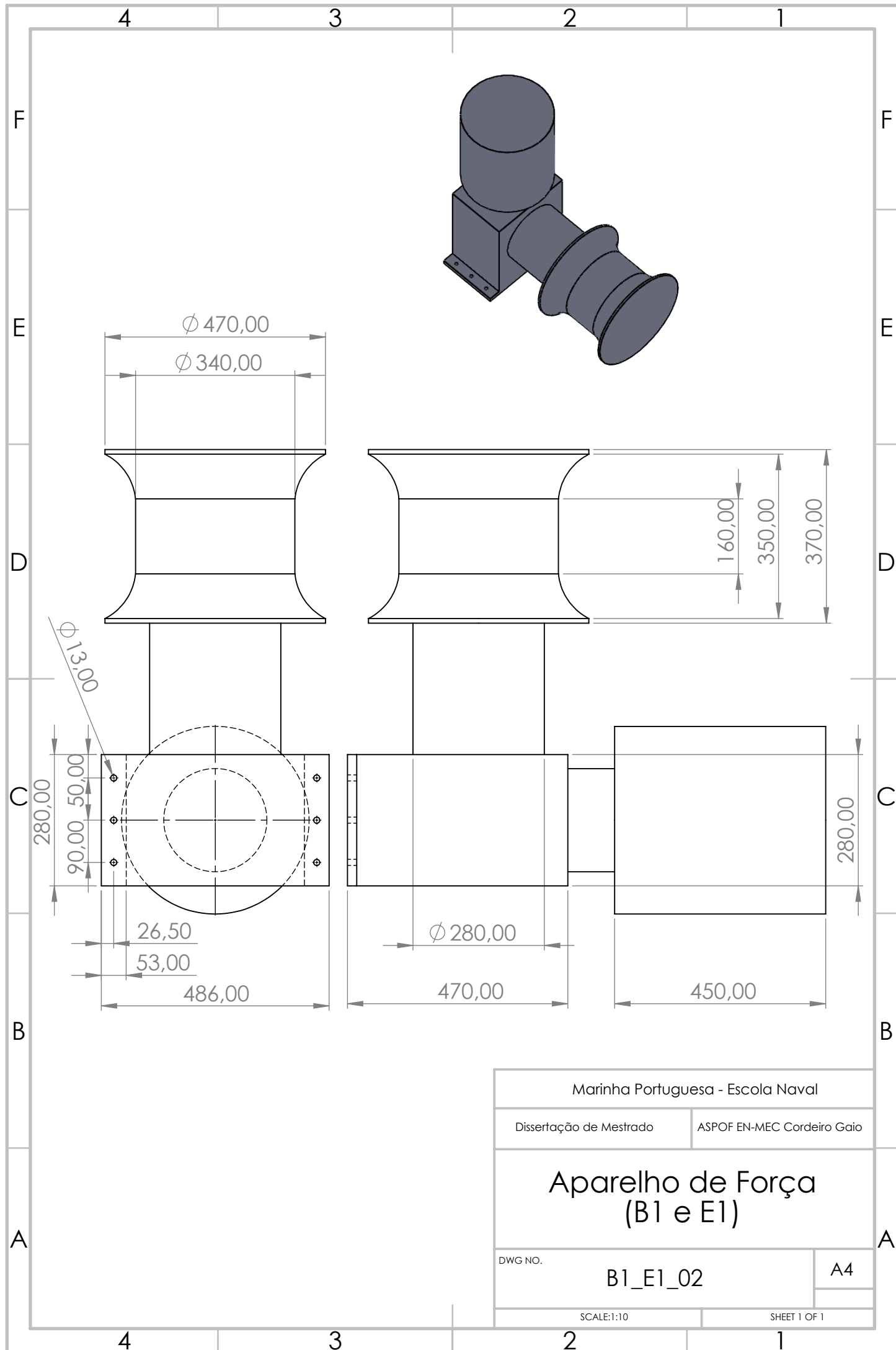
Marca:	Emcé	Carga Máxima:	10 kN
Modelo:	EMC130E	Potência do Motor:	3 kW
Geometria:	Thru deck - vertical	Velocidade de Rotação:	2 velocidades
Fonte de Energia:	Elétrico 400 V	Diâmetro dos Cabos:	22 mm

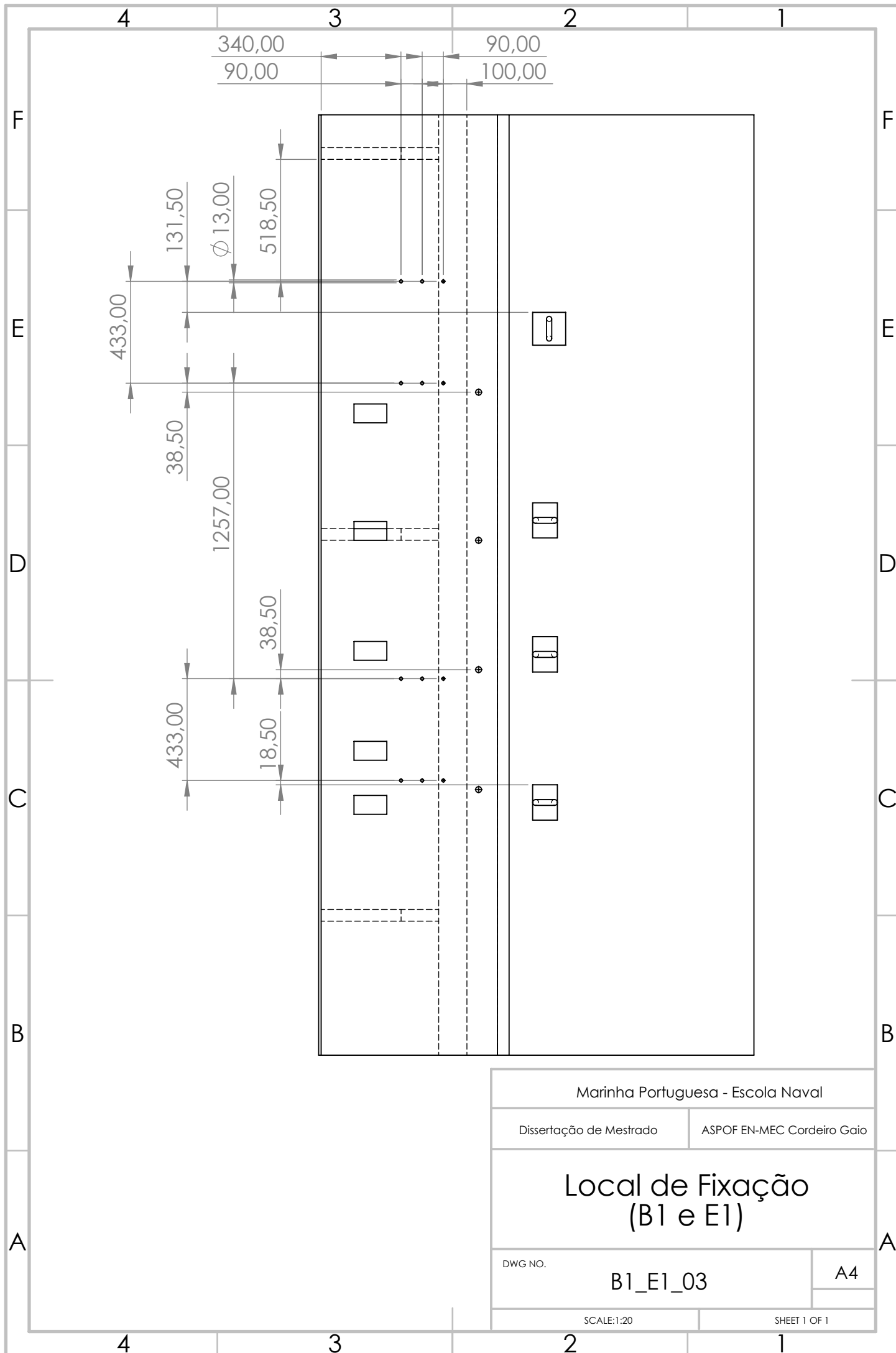


Dimensões [mm]			
D	-	H	375
d	140	h	230
A	420	L	-
B	130	l	-
b	130		

Apêndice J - Instalação dos Aparelhos de Força

Nas páginas seguintes são apresentados os desenhos técnicos das zonas do navio onde se pretende instalar os aparelhos de força, o dimensionamento dos aparelhos e a própria fixação destes à plataforma.





Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Local de Fixação (B1 e E1)

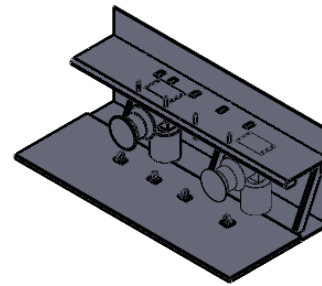
DWG NO.

B1_E1_03

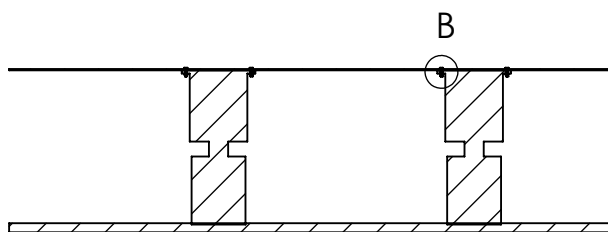
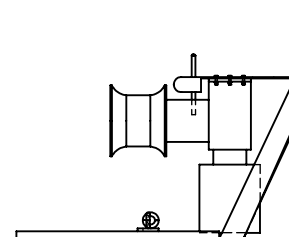
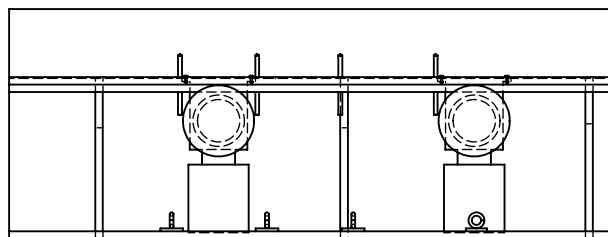
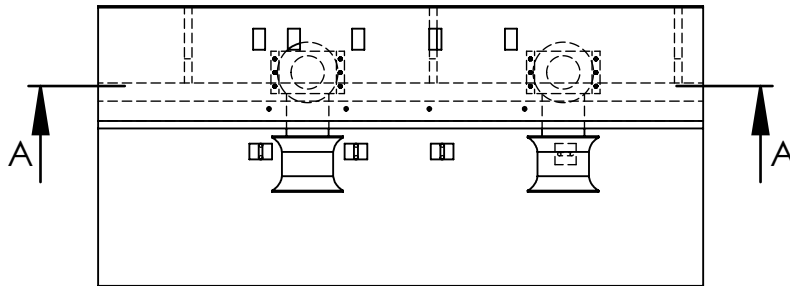
A4

SCALE: 1:20

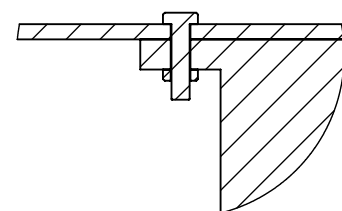
SHEET 1 OF 1



VIEW
SCALE 1 : 50



SECTION A-A
SCALE 1 : 50



DETAIL B
SCALE 1 : 5

Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Instalação Final
(B1 e E1)

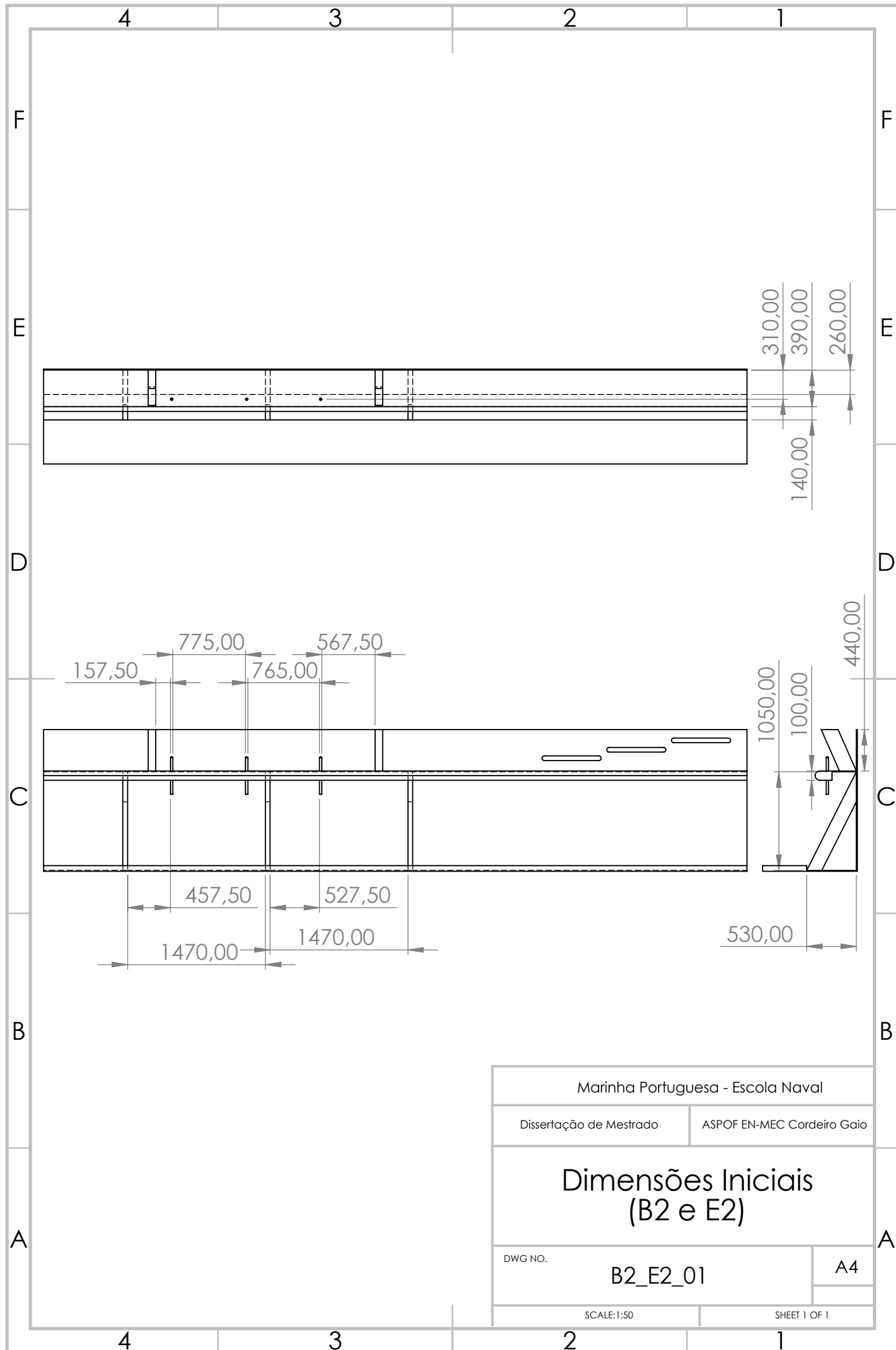
DWG NO.

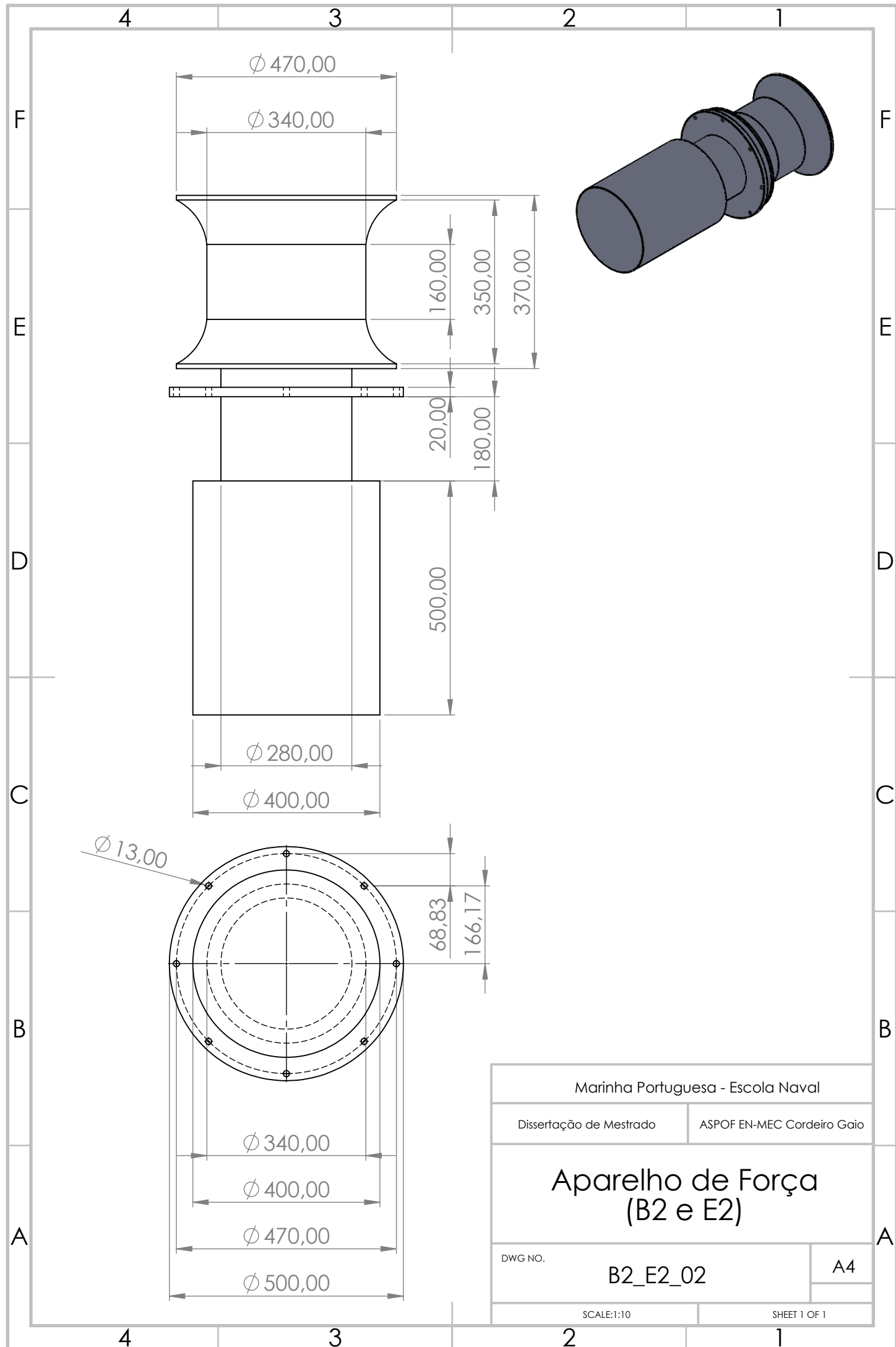
B1_E1_04

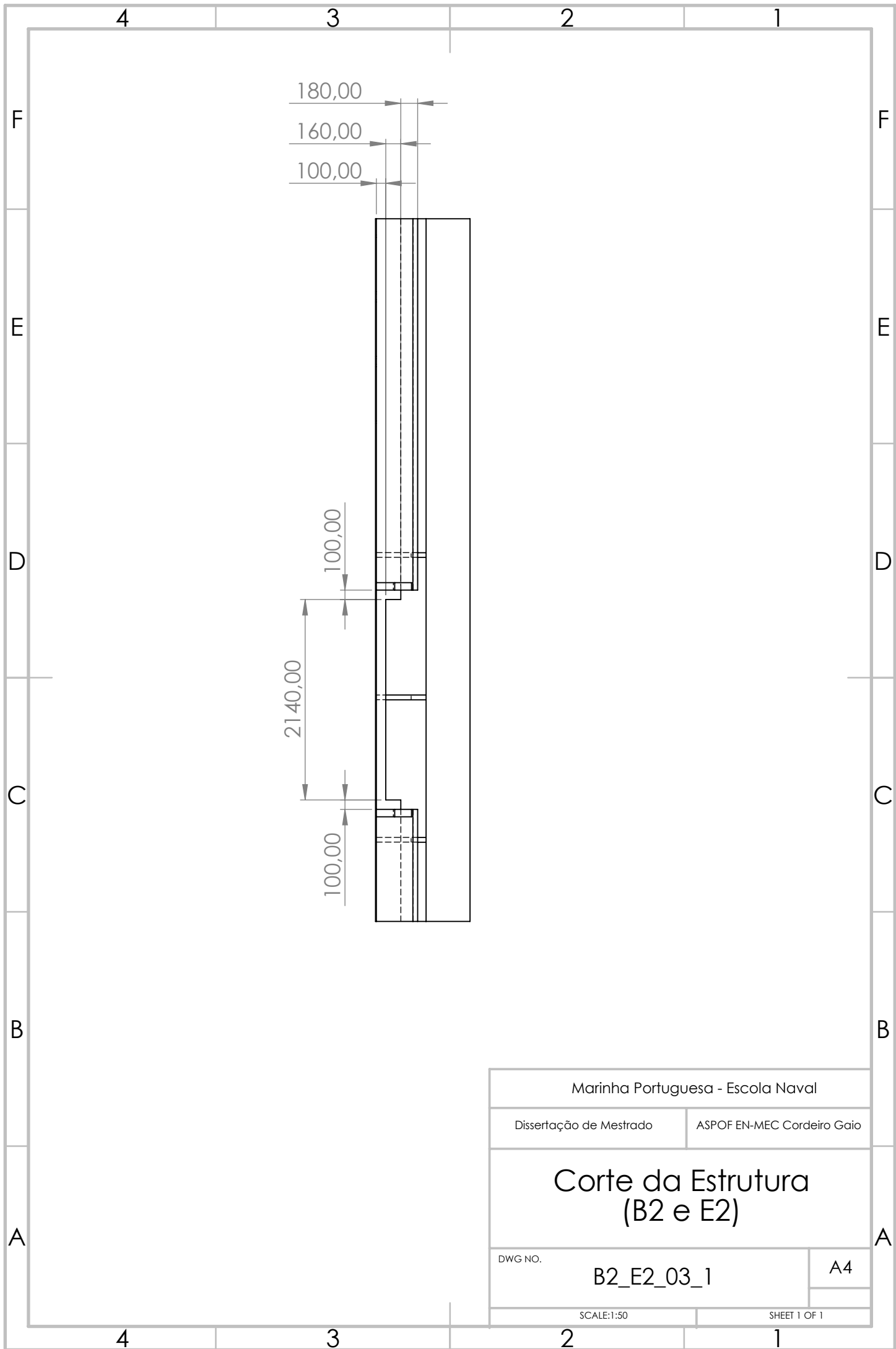
A4

SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1







Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Corte da Estrutura (B2 e E2)

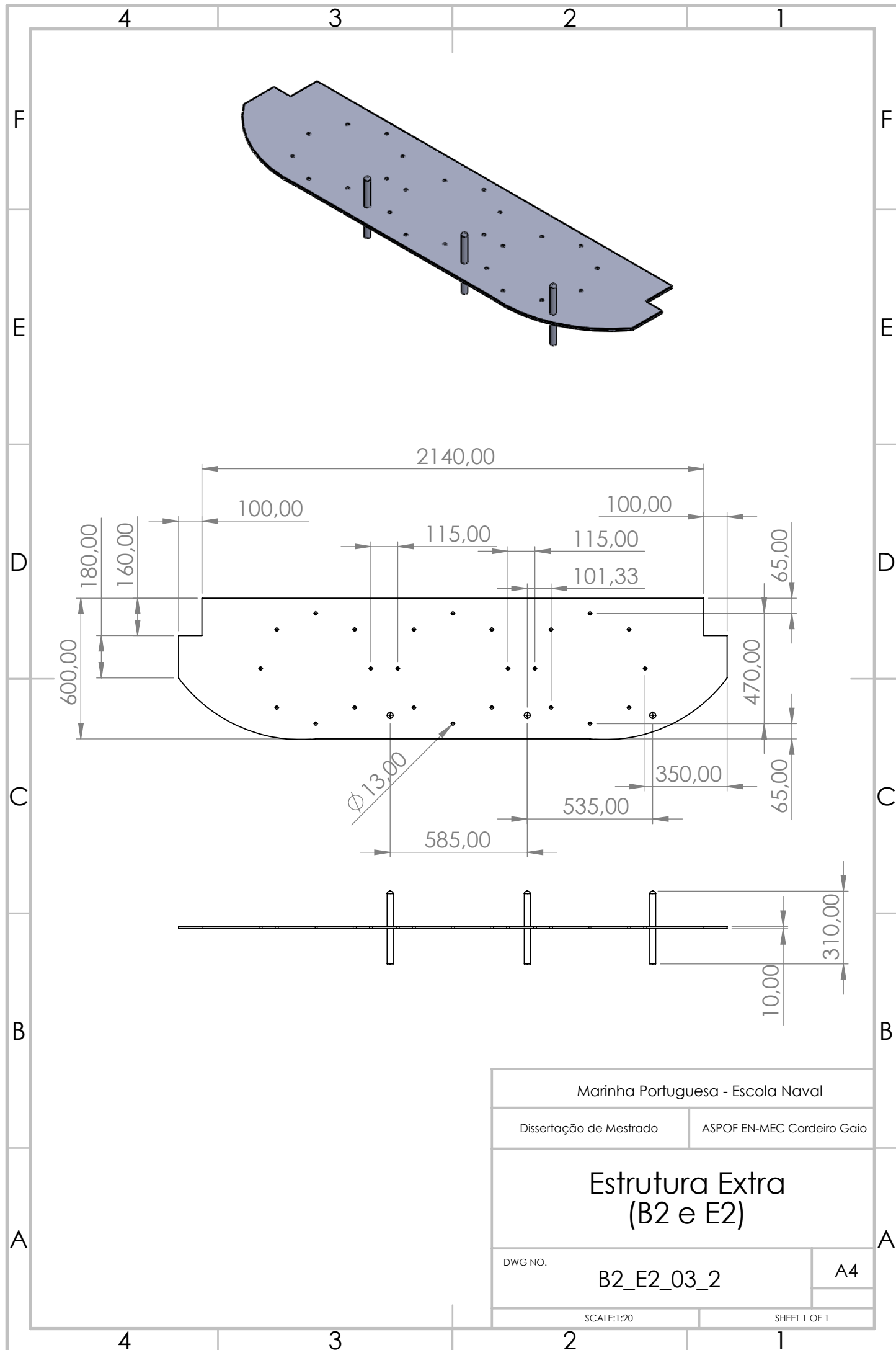
DWG NO.

B2_E2_03_1

A4

SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1



Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Estrutura Extra (B2 e E2)

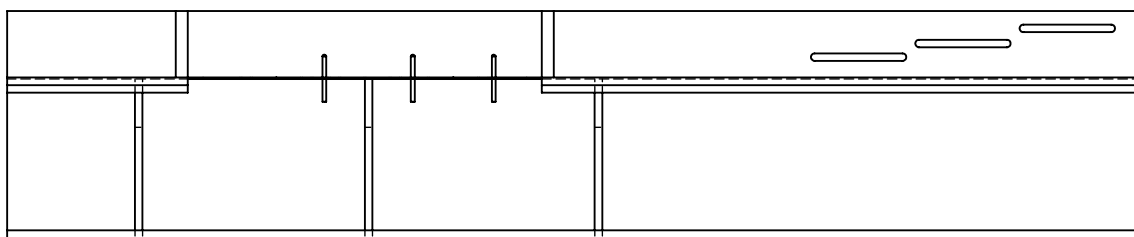
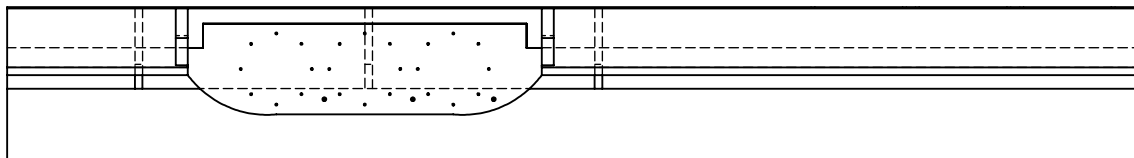
DWG NO.

B2_E2_03_2

A4

SCALE:1:20

SHEET 1 OF 1



Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Local de Fixação (B2 e E2)

DWG NO.

B2_E2_03_3

A4

SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

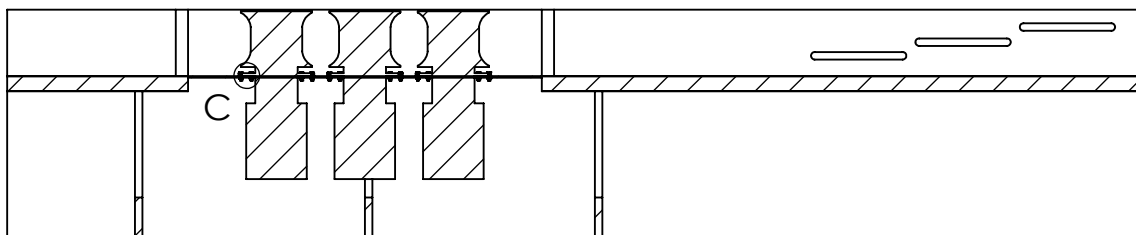
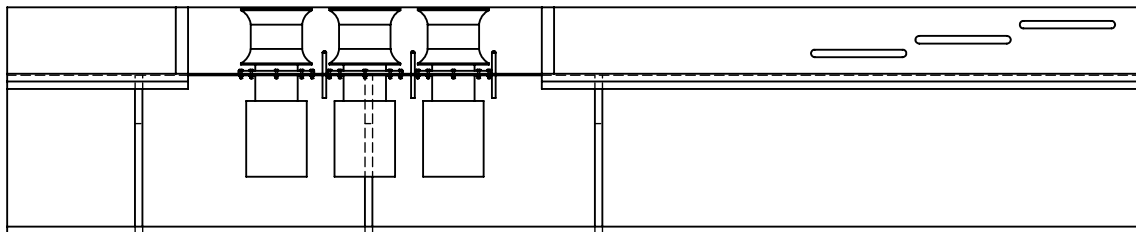
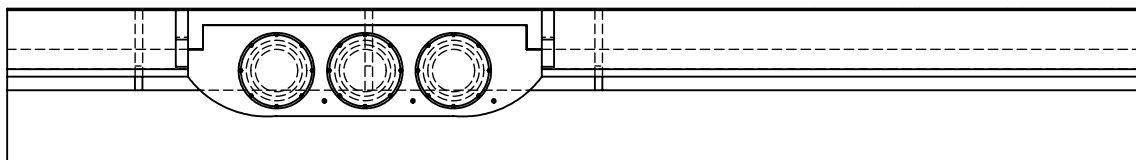
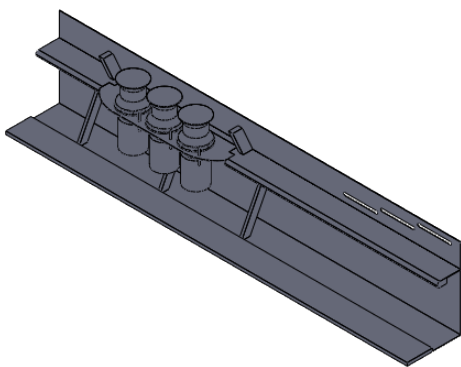
C

B

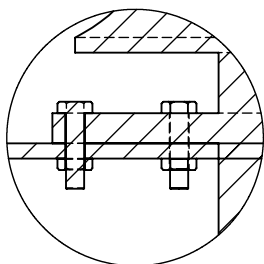
B

A

A



SECTION A-A
SCALE 1 : 50



DETAIL C
SCALE 1 : 5

Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Instalação Final
(B2 e E2)

DWG NO.

B2_E2_04

A4

SCALE:1:50

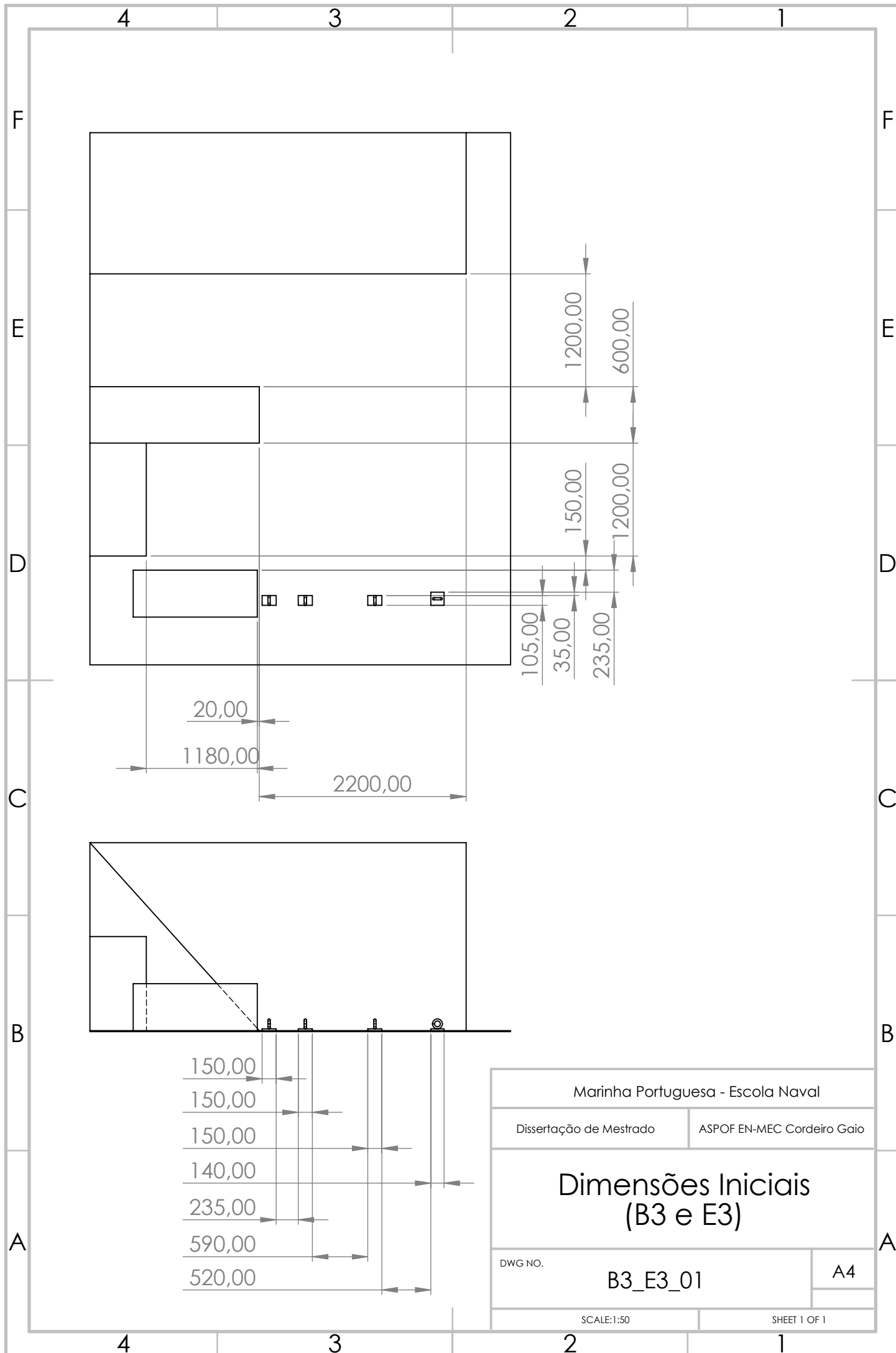
SHEET 1 OF 1

4

3

2

1



Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Dimensões Iniciais (B3 e E3)

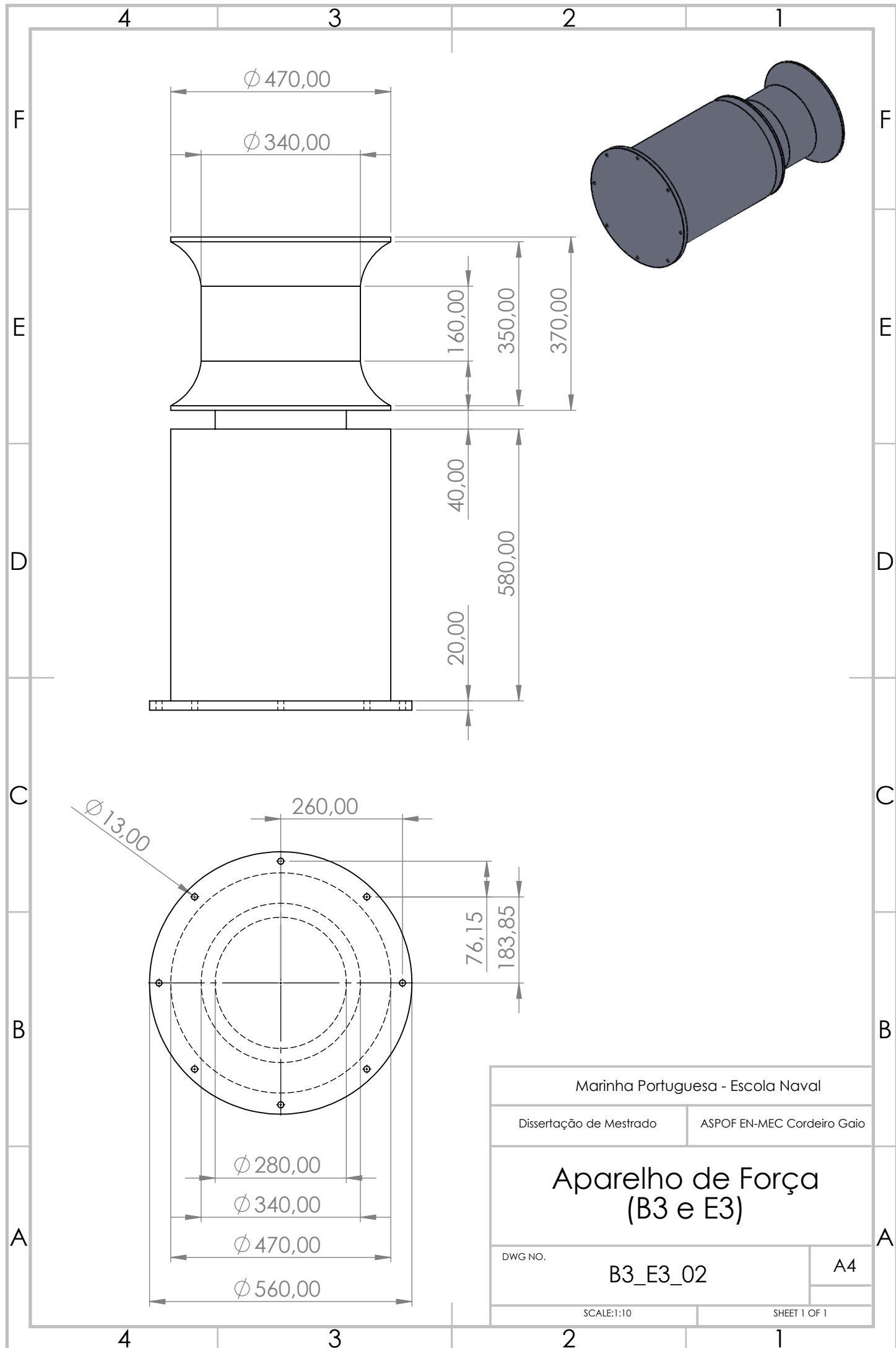
DWG NO.

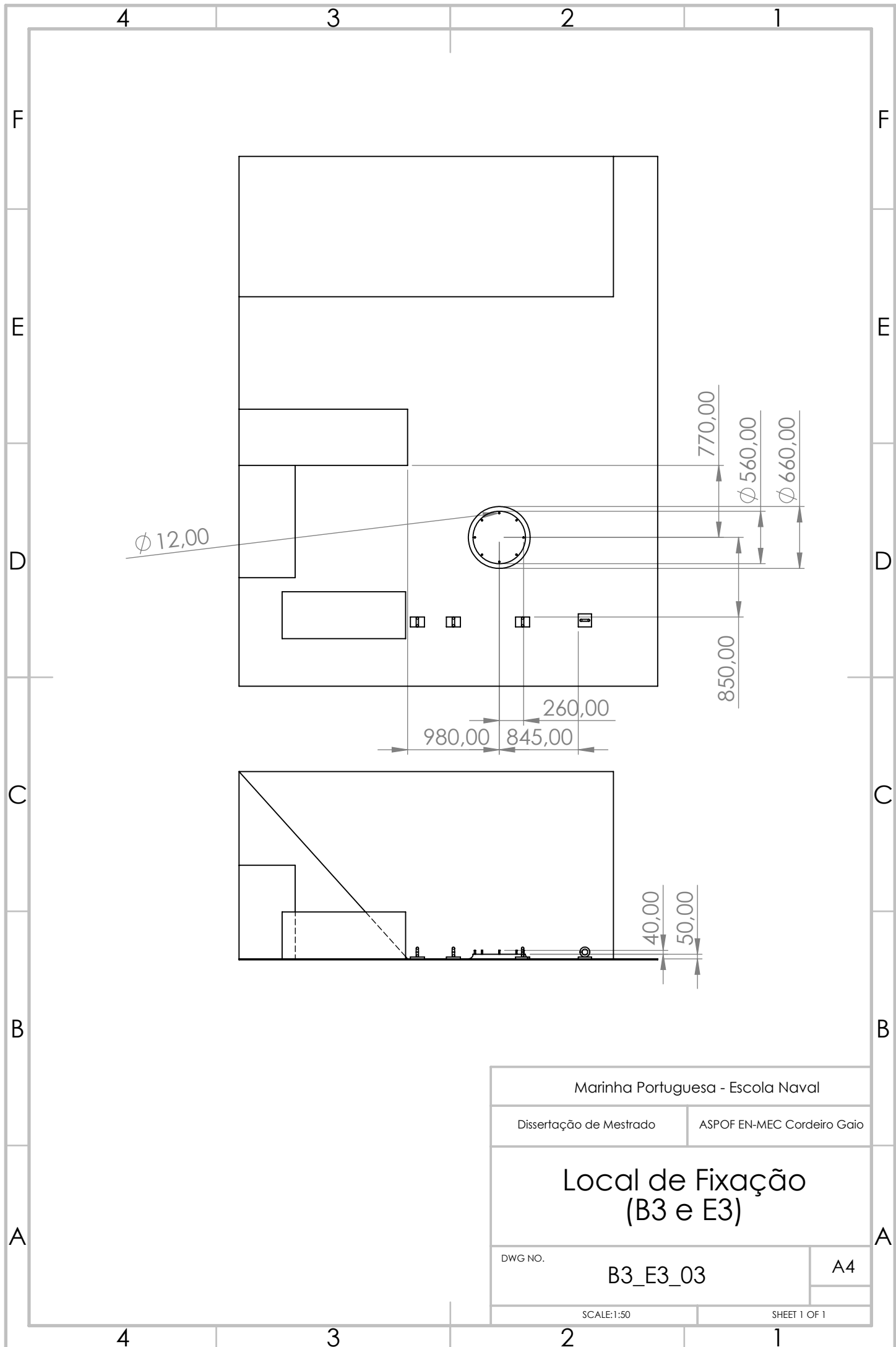
B3_E3_01

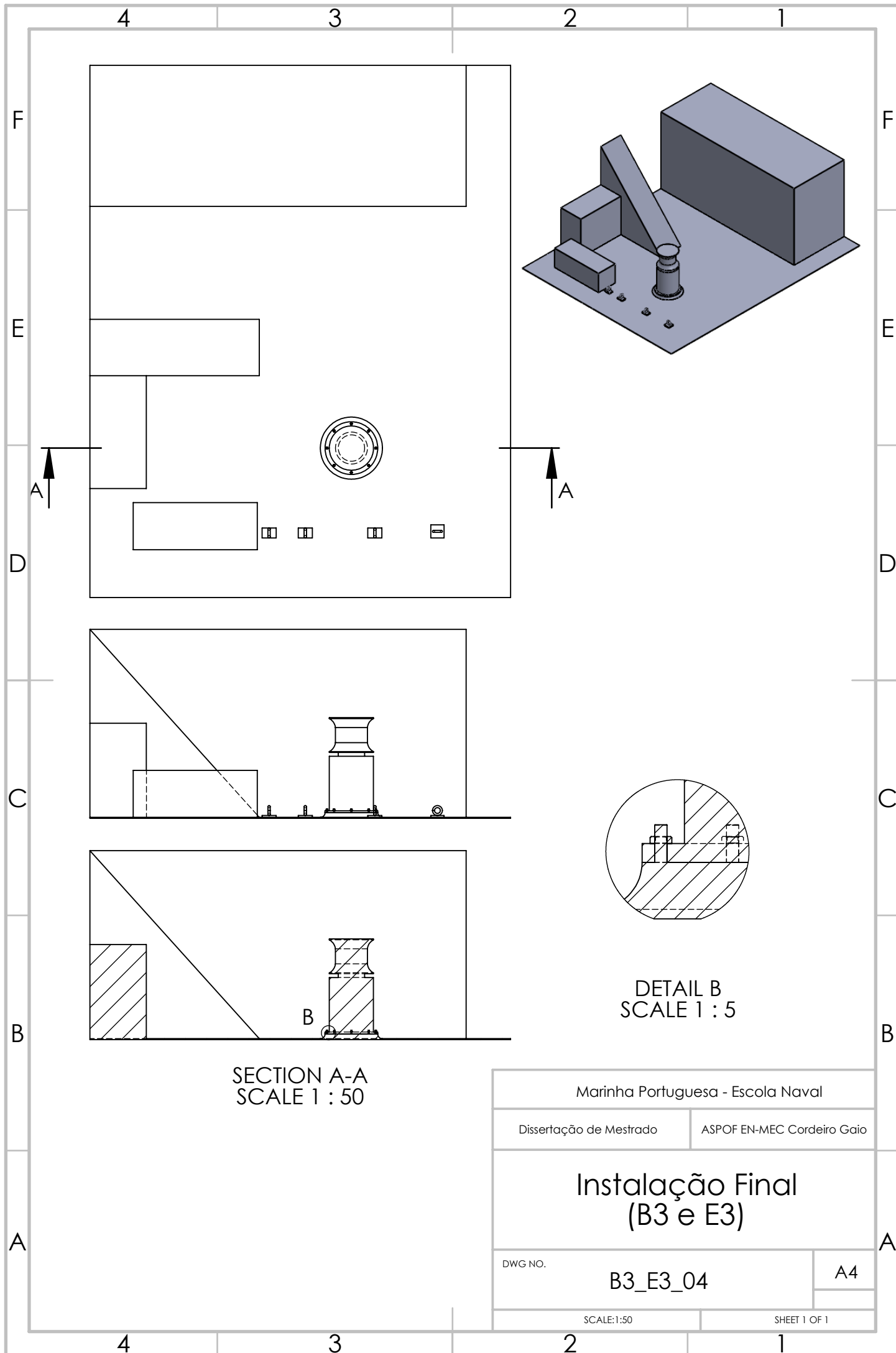
A4

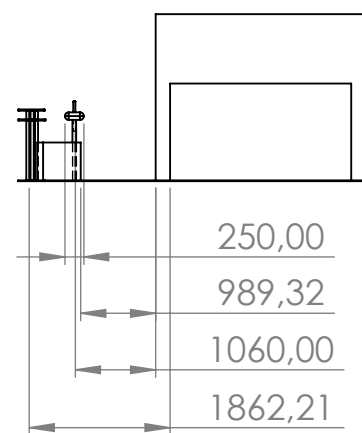
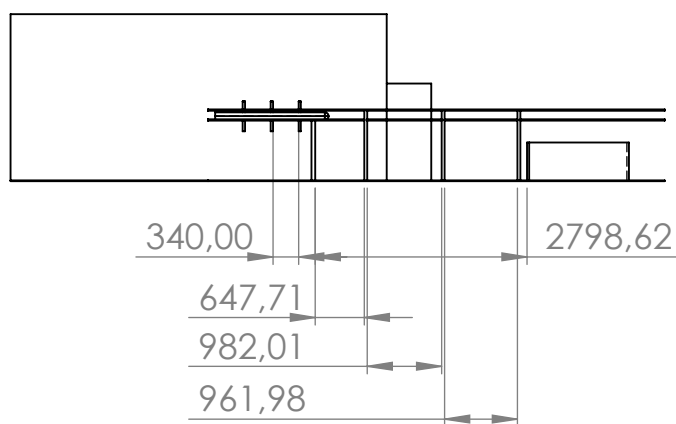
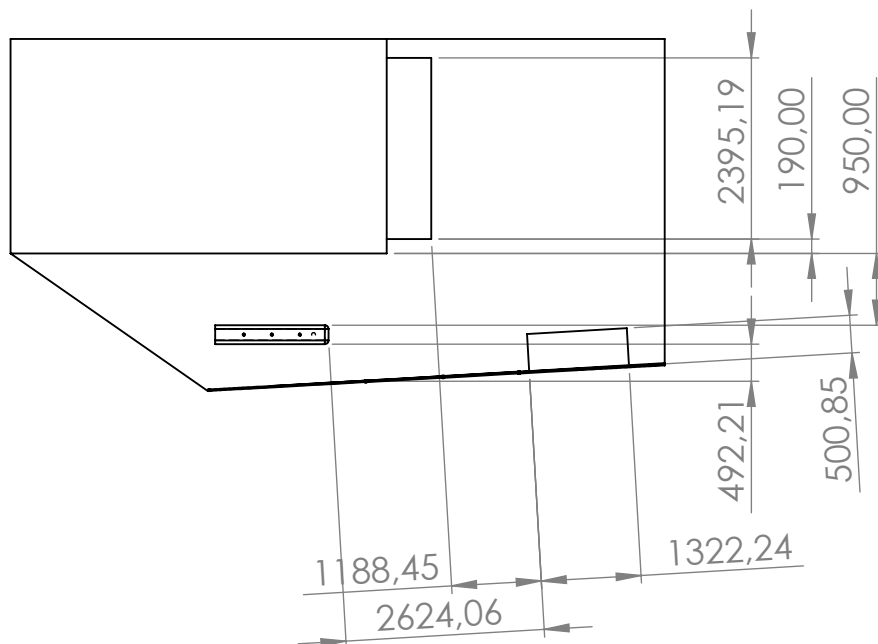
SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1









Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Dimensões Iniciais (B4 e E4)

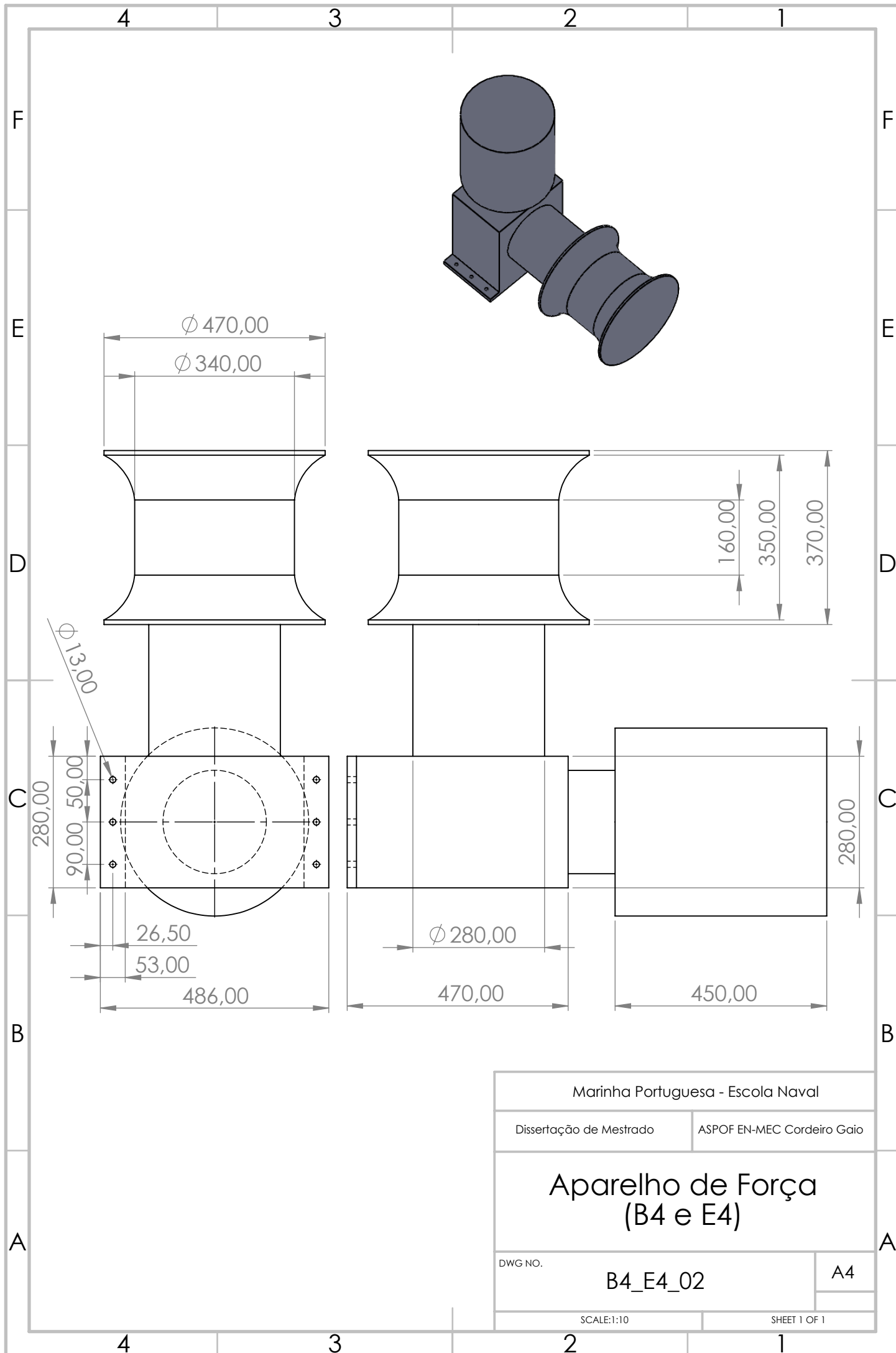
DWG NO.

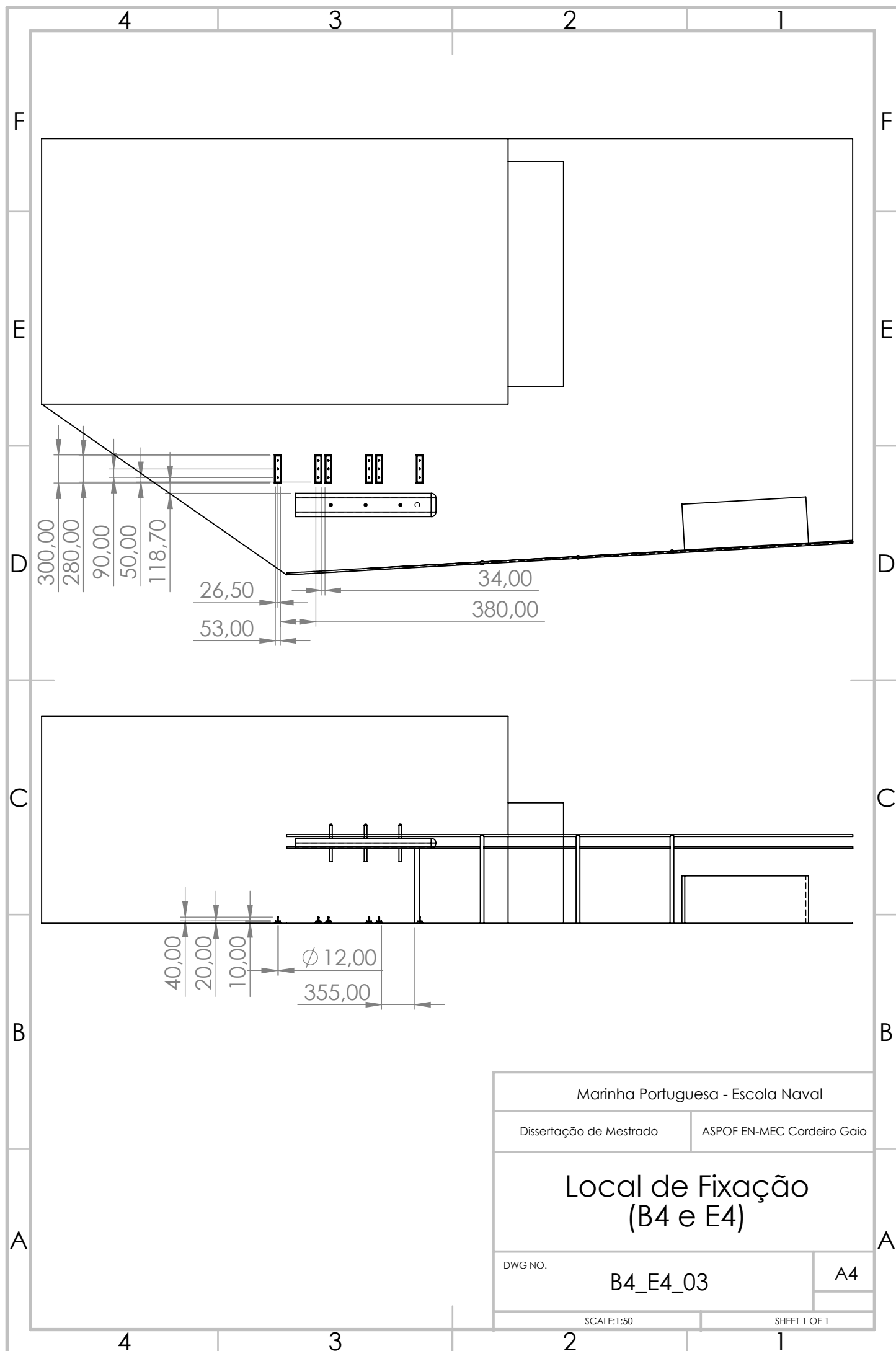
B4_E4_01

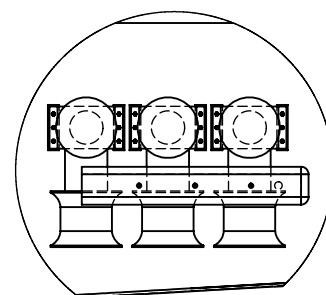
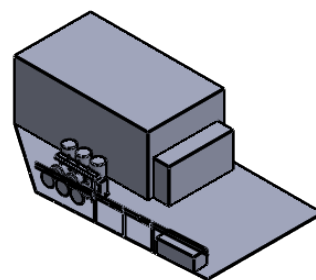
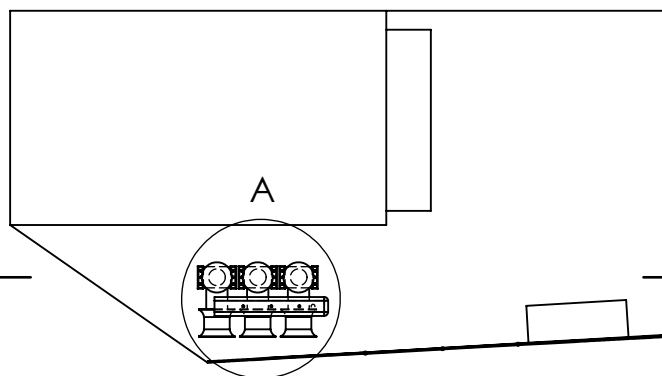
A4

SCALE:1:100

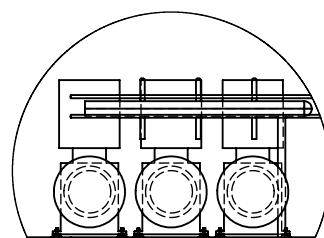
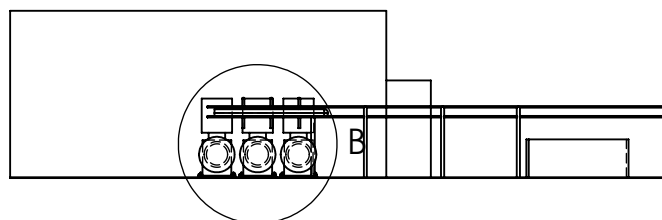
SHEET 1 OF 1



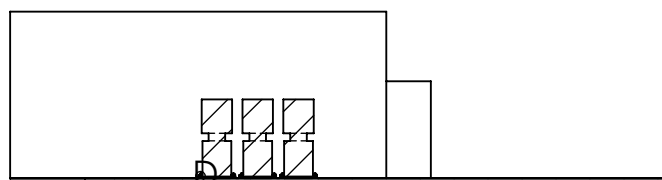




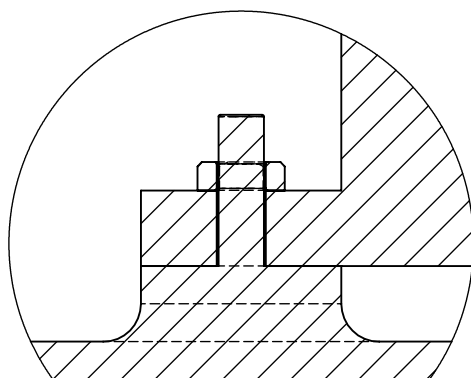
DETAIL A
SCALE 1 : 50



DETAIL B
SCALE 1 : 50



SECTION C-C
SCALE 1 : 100



DETAIL D
SCALE 1 : 2

Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Instalação Final (B4 e E4)

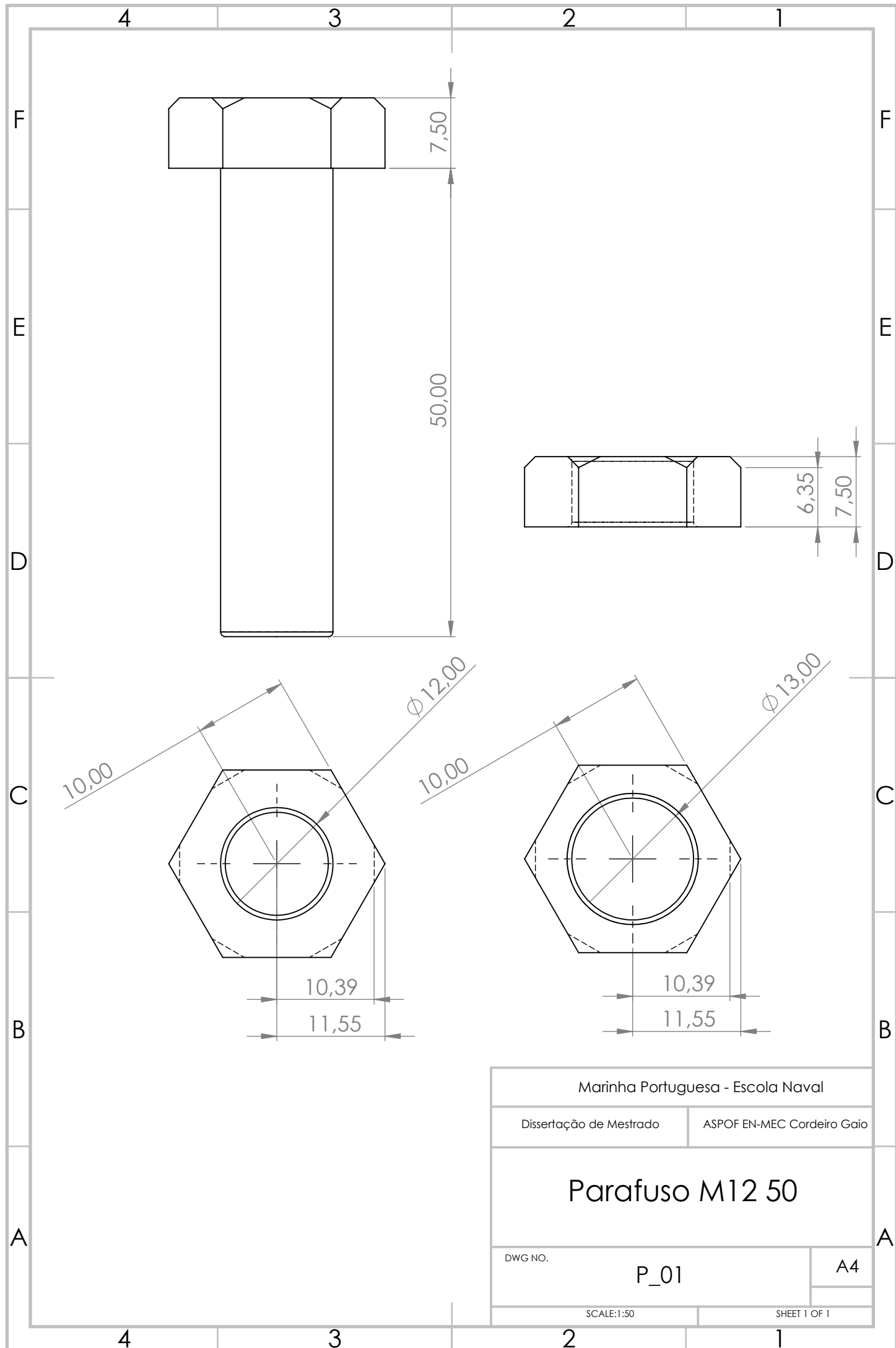
DWG NO.

B4_E4_04

A4

SCALE:1:100

SHEET 1 OF 1



Marinha Portuguesa - Escola Naval

Dissertação de Mestrado

ASPOF EN-MEC Cordeiro Gaio

Parafuso M12 50

DWG NO.

P_01

A4

SCALE:1:50

SHEET 1 OF 1

Apêndice K - Análise Estrutural da Instalação dos Aparelhos de Força

TABELA K.1: Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1

Parâmetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Uni.
Materiais				
T. de cedência do parafuso	σ_{py}	-	640	MPa
T. última do parafuso	σ_{pu}	-	800	MPa
T. de cedência da chapa	σ_{cy}	-	235	MPa
T. última da chapa	σ_{cu}	-	260	MPa
Geometria da Ligação				
Diâmetro furos	d	-	13,0	mm
Diâmetro parafusos	d_0	-	12,0	mm
Diâ. Médio (cabeça do parafuso)	d_m	-	20,0	mm
Distância bordo lateral	e_2	-	26,5	mm
Distância topo	e_1	-	50,0	mm
Esp. sentido esforço	p_1	-	90,0	mm
Esp. perpendicular esforço	p_2	-	433,0	mm
Comp. fiada parafusos	L_v	-	180,0	mm
	L_1	-	26,5	mm
	L_2	$(e_2 + p_2 - 2,5 \cdot d) \cdot \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{cy}}$	118,9	mm
Comprimento topo a topo	L_3	-	280,0	mm
Espessura chapa sob parafuso	t_p	-	20,0	mm
Espessura peça ligação	t	-	10,0	mm
Número de Parafusos	n	-	6	mm

TABELA K.2: Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1
(continuação)

Carregamento				
Força Estática	P	-	10	kN
Efeitos Dinâmicos	-	-	SIM	-
Angulo de Elevação	θ	-	13	°
Ângulo de Desvio	ϕ	-	41	°
Componente vertical	P_z	$P \cdot \cos\theta$	9,74	kN
Componente horizontal	P_y	$P \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$	1,48	kN
Componente normal ao plano	P_x	$P \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi$	1,70	kN
Resistência do chapa ao corte - $V_{eff,Rd}$				
Comprimento efetivo de corte	$L_{v,eff}$	$L_v + L_1 + L_2$	325,4	mm
Área efetiva de corte	$A_{v,eff}$	$L_{v,eff} \cdot t$	3254,4	mm^2
Resistência da chapa ao corte	$V_{eff,Rd}$	$\frac{\sigma_{cy} \cdot A_{v,eff}}{\sqrt{3} \cdot 1,25}$	353,2	kN
Força de corte (limite de utilização)	V_{Sd}	P	10,0	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(V_{eff})}$	$\frac{V_{Sd}}{V_{eff,Rd}}$	35,3	
Resistência da chapa ao corte		$V_{Sd} \leq V_{eff,Rd}$	Verifica	
Resistência do parafuso ao corte - $F_{V,Rd}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	α_V	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,6	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm^2
Resistência dos Parafusos ao Corte	$F_{V,Rd}$	$\frac{\alpha_V \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	27,8	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_x}{n}$	0,3	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_V)}$	$\frac{F_{V,Rd}}{F_{V,Sd}}$	98,2	
Resistência ao Corte		$F_{V,Sd} \leq F_{V,Rd}$	Verifica	

TABELA K.3: Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1
(continuação)

Resistência do parafuso ao esmagamento - $F_{b,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	α_b	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	k_1	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	2,5	-	
Resistência dos Parafusos ao Esmagamento	$F_{b,Rd}$	$\frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot \sigma_{cu} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$	67,6	kN	
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_x}{n}$	0,3	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_b)}$	$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Sd}}$	238,9		
Resistência ao Esmagamento		$F_{V,Sd} \leq F_{b,Rd}$	Verifica		
Resistência do parafuso à Tração - $F_{t,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	k_2	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,9	-	
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm ²	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência dos Parafusos à Tração	$F_{t,Rd}$	$\frac{k_2 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	41,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	1,6	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_t)}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Sd}$	25,7		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$	Verifica		
Resistência ao Punçoamento - $B_{p,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd}$	$\frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \sigma_{cy}}{\gamma_{M2}}$	141,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	1,6	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(B_p)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	87,3		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica		

TABELA K.4: Análise estrutural dos aparelhos de força B1 e E1
(continuação)

Resistência ao Escorregamento - $F_{s,Rd,ser}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	k_s	Q. 3.6 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-
Número de planos de atrito	n_a	-	1,0	-
Coefficiente de atrito	μ_a	Q. 3.7 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,4	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M3}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,1	-
Pré-esforço	$F_{p,C}$	$0,7 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s$	40,5	kN
Resistência aos escorregamento	$F_{s,Rd,ser}$	$\frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$	14,7	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd,ser}$	$\frac{P_z}{n}$	0,3	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_s)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	52,1	
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica	
Corte combinado com tração				
Corte combinado com tração	-	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}$	0,038	-
Corte combinado com tração		$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	Verifica	

TABELA K.5: Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2

Parâmetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Uni.
Materiais				
T. de cedência do parafuso	σ_{py}	-	640	MPa
T. última do parafuso	σ_{pu}	-	800	MPa
T. de cedência da chapa	σ_{cy}	-	235	MPa
T. última da chapa	σ_{cu}	-	260	MPa
Geometria da Ligação				
Diâmetro furos	d	-	13,0	mm
Diâmetro parafusos	d_0	-	12,0	mm
Diâ. Médio (cabeça do parafuso)	d_m	-	20,0	mm
Distância bordo lateral	e_2	-	15,0	mm
Distância topo	e_1	-	15,0	mm
Esp. sentido esforço	p_1	-	100,0	mm
Esp. perpendicular esforço	p_2	-	100,0	mm
Comp. fiada parafusos	L_v	-	470,0	mm
	L_1	-	15,0	mm
	L_2	$(e_2 + p_2 - 2,5 \cdot d) \cdot \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{cy}}$	91,3	mm
Comprimento topo a topo	L_3	-	500,0	mm
Espessura chapa sob parafuso	t_p	-	20,0	mm
Espessura peça ligação	t	-	10,0	mm
Número de Parafusos	n	-	8	mm

TABELA K.6: Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2
(continuação)

Carregamento				
Força Estática	P	-	10	kN
Efeitos Dinâmicos	-	-	SIM	-
Angulo de Elevação	θ	-	86	°
Ângulo de Desvio	ϕ	-	79	°
Componente vertical	P_z	$P \cdot \cos\theta$	0,70	kN
Componente horizontal	P_y	$P \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$	9,79	kN
Componente normal ao plano	P_x	$P \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi$	1,90	kN
Resistência do chapa ao corte - $V_{eff,Rd}$				
Comprimento efetivo de corte	$L_{v,eff}$	$L_v + L_1 + L_2$	576,3	mm
Área efetiva de corte	$A_{v,eff}$	$L_{v,eff} \cdot t$	5762,8	mm^2
Resistência da chapa ao corte	$V_{eff,Rd}$	$\frac{\sigma_{cy} \cdot A_{v,eff}}{\sqrt{3} \cdot 1,25}$	625,5	kN
Força de corte (limite de utilização)	V_{Sd}	P_y	9,8	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(V_{eff})}$	$\frac{V_{Sd}}{V_{eff,Rd}}$	63,9	
Resistência da chapa ao corte		$V_{Sd} \leq V_{eff,Rd}$	Verifica	
Resistência do parafuso ao corte - $F_{V,Rd}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	α_V	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,6	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm^2
Resistência dos Parafusos ao Corte	$F_{V,Rd}$	$\frac{\alpha_V \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	27,8	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_y}{n}$	1,2	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_V)}$	$\frac{F_{V,Rd}}{F_{V,Sd}}$	22,7	
Resistência ao Corte		$F_{V,Sd} \leq F_{V,Rd}$	Verifica	

TABELA K.7: Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2
(continuação)

Resistência do parafuso ao esmagamento - $F_{b,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	α_b	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	k_1	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	2,5	-	
Resistência dos Parafusos ao Esmagamento	$F_{b,Rd}$	$\frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot \sigma_{cu} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$	67,6	kN	
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_y}{n}$	1,2	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_b)}$	$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Sd}}$	55,2		
Resistência ao Esmagamento		$F_{V,Sd} \leq F_{b,Rd}$	Verifica		
Resistência do parafuso à Tração - $F_{t,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	k_2	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,9	-	
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm ²	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência dos Parafusos à Tração	$F_{t,Rd}$	$\frac{k_2 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	41,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	0,1	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_t)}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Sd}$	478,1		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$	Verifica		
Resistência ao Punçoamento - $B_{p,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd}$	$\frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \sigma_{cy}}{\gamma_{M2}}$	141,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	0,1	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(B_p)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	1625,6		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica		

TABELA K.8: Análise estrutural dos aparelhos de força B2 e E2
(continuação)

Resistência ao Escorregamento - $F_{s,Rd,ser}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	k_s	Q. 3.6 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-
Número de planos de atrito	n_a	-	1,0	-
Coefficiente de atrito	μ_a	Q. 3.7 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,4	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M3}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,1	-
Pré-esforço	$F_{p,C}$	$0,7 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s$	40,5	kN
Resistência aos escorregamento	$F_{s,Rd,ser}$	$\frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$	14,7	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd,ser}$	$\frac{P_y}{n}$	1,2	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_s)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	12,0	
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica	
Corte combinado com tração				
Corte combinado com tração	-	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}$	0,046	-
Corte combinado com tração		$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	Verifica	

TABELA K.9: Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3

Parâmetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Uni.
Materiais				
T. de cedência do parafuso	σ_{py}	-	640	MPa
T. última do parafuso	σ_{pu}	-	800	MPa
T. de cedência da chapa	σ_{cy}	-	235	MPa
T. última da chapa	σ_{cu}	-	260	MPa
Geometria da Ligação				
Diâmetro furos	d	-	13,0	mm
Diâmetro parafusos	d_0	-	12,0	mm
Diâ. Médio (cabeça do parafuso)	d_m	-	20,0	mm
Distância bordo lateral	e_2	-	20,0	mm
Distância topo	e_1	-	20,0	mm
Esp. sentido esforço	p_1	-	110,0	mm
Esp. perpendicular esforço	p_2	-	110,0	mm
Comp. fiada parafusos	L_v	-	520,0	mm
	L_1	-	20,0	mm
	L_2	$(e_2 + p_2 - 2,5 \cdot d) \cdot \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{cy}}$	107,9	mm
Comprimento topo a topo	L_3	-	560,0	mm
Espessura chapa sob parafuso	t_p	-	20,0	mm
Espessura peça ligação	t	-	10,0	mm
Número de Parafusos	n	-	8	mm

TABELA K.10: Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3
(continuação)

Carregamento				
Força Estática	P	-	10	kN
Efeitos Dinâmicos	-	-	SIM	-
Angulo de Elevação	θ	-	7	°
Ângulo de Desvio	ϕ	-	5	°
Componente vertical	P_z	$P \cdot \cos\theta$	9,93	kN
Componente horizontal	P_y	$P \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$	0,11	kN
Componente normal ao plano	P_x	$P \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi$	1,21	kN
Resistência do chapa ao corte - $V_{eff,Rd}$				
Comprimento efetivo de corte	$L_{v,eff}$	$L_v + L_1 + L_2$	647,9	mm
Área efetiva de corte	$A_{v,eff}$	$L_{v,eff} \cdot t$	6478,7	mm ²
Resistência da chapa ao corte	$V_{eff,Rd}$	$\frac{\sigma_{cy} \cdot A_{v,eff}}{\sqrt{3} \cdot 1,25}$	703,2	kN
Força de corte (limite de utilização)	V_{Sd}	P_x	1,2	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(V_{eff})}$	$\frac{V_{Sd}}{V_{eff,Rd}}$	579,2	
Resistência da chapa ao corte		$V_{Sd} \leq V_{eff,Rd}$	Verifica	
Resistência do parafuso ao corte - $F_{V,Rd}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	α_V	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,6	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm ²
Resistência dos Parafusos ao Corte	$F_{V,Rd}$	$\frac{\alpha_V \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	27,8	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_x}{n}$	0,2	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_V)}$	$\frac{F_{V,Rd}}{F_{V,Sd}}$	183,2	
Resistência ao Corte		$F_{V,Sd} \leq F_{V,Rd}$	Verifica	

TABELA K.11: Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3
(continuação)

Resistência do parafuso ao esmagamento - $F_{b,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	α_b	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	k_1	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	2,5	-	
Resistência dos Parafusos ao Esmagamento	$F_{b,Rd}$	$\frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot \sigma_{cu} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$	67,6	kN	
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_x}{n}$	0,2	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_b)}$	$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Sd}}$	445,4		
Resistência ao Esmagamento		$F_{V,Sd} \leq F_{b,Rd}$	Verifica		
Resistência do parafuso à Tração - $F_{t,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	k_2	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,9	-	
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm ²	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência dos Parafusos à Tração	$F_{t,Rd}$	$\frac{k_2 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	41,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	1,2	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_t)}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Sd}$	33,6		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$	Verifica		
Resistência ao Punçoamento - $B_{p,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd}$	$\frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \sigma_{cy}}{\gamma_{M2}}$	141,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	1,2	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(B_p)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	114,3		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica		

TABELA K.12: Análise estrutural dos aparelhos de força B3 e E3
(continuação)

Resistência ao Escorregamento - $F_{s,Rd,ser}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	k_s	Q. 3.6 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-
Número de planos de atrito	n_a	-	1,0	-
Coefficiente de atrito	μ_a	Q. 3.7 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,4	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M3}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,1	-
Pré-esforço	$F_{p,C}$	$0,7 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s$	40,5	kN
Resistência aos escorregamento	$F_{s,Rd,ser}$	$\frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$	14,7	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd,ser}$	$\frac{P_x}{n}$	0,2	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_s)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	97,1	
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica	
Corte combinado com tração				
Corte combinado com tração	-	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}$	0,027	-
Corte combinado com tração		$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	Verifica	

TABELA K.13: Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4

Parâmetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Uni.
Materiais				
T. de cedência do parafuso	σ_{py}	-	640	MPa
T. última do parafuso	σ_{pu}	-	800	MPa
T. de cedência da chapa	σ_{cy}	-	235	MPa
T. última da chapa	σ_{cu}	-	260	MPa
Geometria da Ligação				
Diâmetro furos	d	-	13,0	mm
Diâmetro parafusos	d_0	-	12,0	mm
Diâ. Médio (cabeça do parafuso)	d_m	-	20,0	mm
Distância bordo lateral	e_2	-	26,5	mm
Distância topo	e_1	-	50,0	mm
Esp. sentido esforço	p_1	-	433,0	mm
Esp. perpendicular esforço	p_2	-	90,0	mm
Comp. fiada parafusos	L_v	-	180,0	mm
	L_1	-	26,5	mm
	L_2	$(e_2 + p_2 - 2,5 \cdot d) \cdot \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{cy}}$	498,4	mm
Comprimento topo a topo	L_3	-	280,0	mm
Espessura chapa sob parafuso	t_p	-	20,0	mm
Espessura peça ligação	t	-	10,0	mm
Número de Parafusos	n	-	6	mm

TABELA K.14: Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4
(continuação)

Carregamento				
Força Estática	P	-	10	kN
Efeitos Dinâmicos	-	-	SIM	-
Angulo de Elevação	θ	-	90	°
Ângulo de Desvio	ϕ	-	76	°
Componente vertical	P_z	$P \cdot \cos\theta$	0	kN
Componente horizontal	P_y	$P \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi$	9,70	kN
Componente normal ao plano	P_x	$P \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi$	2,42	kN
Resistência do chapa ao corte - $V_{eff,Rd}$				
Comprimento efetivo de corte	$L_{v,eff}$	$L_v + L_1 + L_2$	704,9	mm
Área efetiva de corte	$A_{v,eff}$	$L_{v,eff} \cdot t$	7049,3	mm^2
Resistência da chapa ao corte	$V_{eff,Rd}$	$\frac{\sigma_{cy} \cdot A_{v,eff}}{\sqrt{3} \cdot 1,25}$	765,1	kN
Força de corte (limite de utilização)	V_{Sd}	P_y	9,7	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(V_{eff})}$	$\frac{V_{Sd}}{V_{eff,Rd}}$	78,9	
Resistência da chapa ao corte		$V_{Sd} \leq V_{eff,Rd}$	Verifica	
Resistência do parafuso ao corte - $F_{V,Rd}$				
Coefficiente Parcial de Segurança	α_V	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,6	-
Coefficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm^2
Resistência dos Parafusos ao Corte	$F_{V,Rd}$	$\frac{\alpha_V \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	27,8	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_y}{n}$	1,6	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_V)}$	$\frac{F_{V,Rd}}{F_{V,Sd}}$	17,1	
Resistência ao Corte		$F_{V,Sd} \leq F_{V,Rd}$	Verifica	

TABELA K.15: Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4
(continuação)

Resistência do parafuso ao esmagamento - $F_{b,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	α_b	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Coeficiente Parcial de Segurança	k_1	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	2,5	-	
Resistência dos Parafusos ao Esmagamento	$F_{b,Rd}$	$\frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot \sigma_{cu} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$	67,6	kN	
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd}$	$\frac{P_y}{n}$	1,6	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_b)}$	$\frac{F_{b,Rd}}{F_{b,Sd}}$	41,8		
Resistência ao Esmagamento		$F_{V,Sd} \leq F_{b,Rd}$	Verifica		
Resistência do parafuso à Tração - $F_{t,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	k_2	Q. 3.4 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,9	-	
Área da Secção resistente do parafuso	A_s	$\frac{\pi \cdot (0,8 \cdot d_0)^2}{4}$	72,4	mm ²	
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência dos Parafusos à Tração	$F_{t,Rd}$	$\frac{k_2 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	41,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	0	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(F_t)}$	$F_{t,Rd}/F_{t,Sd}$	-		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$	Verifica		
Resistência ao Punçoamento - $B_{p,Rd}$					
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M2}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,25	-	
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd}$	$\frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \sigma_{cy}}{\gamma_{M2}}$	141,7	kN	
Força de tração parafuso (limite de utilização)	$F_{t,Sd}$	$\frac{P_z}{n}$	0	kN	
Fator de segurança	$\eta_{S(B_p)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	-		
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica		

TABELA K.16: Análise estrutural dos aparelhos de força B4 e E4
(continuação)

Resistência ao Escorregamento - $F_{s,Rd,ser}$				
Coeficiente Parcial de Segurança	k_s	Q. 3.6 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,0	-
Número de planos de atrito	n_a	-	1,0	-
Coeficiente de atrito	μ_a	Q. 3.7 (Eurocode 3, 1 - 8)	0,4	-
Coeficiente Parcial de Segurança	γ_{M3}	Q. 2.1 (Eurocode 3, 1 - 8)	1,1	-
Pré-esforço	$F_{p,C}$	$0,7 \cdot \sigma_{pu} \cdot A_s$	40,5	kN
Resistência aos escorregamento	$F_{s,Rd,ser}$	$\frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$	14,7	kN
Força de corte parafuso (limite de utilização)	$F_{V,Sd,ser}$	$\frac{P_y}{n}$	1,6	kN
Fator de segurança	$\eta_{S(F_s)}$	$\frac{B_{p,Rd}}{F_{t,Sd}}$	9,1	
Resistência ao Esmagamento		$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	Verifica	
Corte combinado com tração				
Corte combinado com tração	-	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}$	0,058	-
Corte combinado com tração		$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$	Verifica	