

Prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões: metodologia construtiva e condições geotécnicas

JORGE MIGUEL VARANDAS GONÇALVES PROENÇA
Outubro de 2020



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões: metodologia construtiva e condições geotécnicas

Jorge Miguel Varandas Gonçalves Proença



isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

P. PORTO

2020

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões:
metodologia construtiva e condições geotécnicas**

*Extension of the exterior breakwater of the Port of Leixões: construction
methodology and geotechnical conditions*

Jorge Miguel Varandas Gonçalves Proença

1151922

*Estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para
cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor Hugo
Guedes Lopes, Professor Adjunto Convidado do Departamento de Engenharia
Geotécnica do ISEP e coorientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor
Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Hugo Guedes Lopes

Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, Matosinhos

Doutora Ana Cristina Pires

Investigadora Auxiliar, Centro de Robótica e Sistemas Autónomos, INESC TEC e Instituto Superior de Engenharia do Porto

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Jorge Proença**, em 13 de Novembro de 2020 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **14 (catorze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta dissertação:

A meus Pais.

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Finda esta dissertação gostaria de agradecer primeiramente a meus Pais por todo o apoio que sempre me prestaram em momentos marcantes e que me propiciaram com todas as condições necessárias até ao culminar desta etapa tão significativa para mim.

Gostaria também de expressar a minha gratidão ao meu orientador, o Doutor Hugo Guedes Lopes (APDL e DEG|ISEP), por toda a solicitude, atenção, esforço e disponibilidade para me conseguir transmitir os conteúdos relevantes na orientação da minha dissertação, bem como dos conhecimentos que me transmitiu nas aulas de obras marítimas e fluviais, sobre engenharias costeira e portuária. Grato pela revisão crítica ao manuscrito original.

Também endereço palavras de grande reconhecimento ao Professor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP e LABCARGA), que desde o início me convenceu a fazer a escolha pela opção do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente e me acompanhou no esclarecimento das minhas dúvidas técnico-científicas e interpessoais, sendo que hoje lhe reconheço e lhe gratulo essa supervisão por todas as valências, oportunidades, experiências e pelo proveito que as mesmas tiveram no desenvolvimento e melhoria dos meus conhecimentos científicos e dimensão humana. Por fim, a leitura crítica atenta ao manuscrito original.

Quero por final também deixar uma mensagem de apreço especial aos meus colegas de curso, com quem partilhei momentos e conhecimentos, ideias e entreaajuda que foram importantes durante toda esta etapa, bem como a todos os meus amigos que sempre me apoiaram, aconselharam e se disponibilizaram em todos os momentos essenciais neste caminho que percorri até aqui.

Não seria possível sem todos vocês.

Muito obrigado a todos!

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Porto de Leixões, Geotecnia Portuária, Desenvolvimento Portuário, Engenharia Costeira

Resumo

As estruturas portuárias desempenham atualmente um papel que contribui diretamente para a atividade económica e para a criação de emprego a nível regional. Neste contexto, a APDL tem levado a cabo nos últimos anos ações de reforma, reestruturação e modernização da sua área portuária de maneira a conseguir responder a toda a espécie de desafios que se vão assomando, bem como a todos aqueles que se conjeturam a médio-longo prazo. O presente trabalho incide nos processos e metodologias construtivas inerentes a uma destas ações, nomeadamente o projeto de requalificação respeitante à extensão do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. São enumerados e descritos os principais eventos desfavoráveis que interatuam com este tipo de obras, sobretudo aquelas que estão correlacionadas com a agitação marítima. Previamente à análise do caso de estudo é descrita a evolução histórica deste porto, desde a sua construção até à atualidade. É realizado o enquadramento da obra através da análise da geomorfologia, geologia e geotecnia da área da intervenção. Para a obtenção de um acurado enquadramento geológico-geotécnico foram analisadas as campanhas de prospeção realizadas pelas empresas Tecnasol, Geoma, UA, Geosub e Argonvia. São apresentadas as estruturas de proteção usualmente implementadas num porto e é abordado o processo construtivo de um quebra-mar de taludes; tipologia selecionada para o projeto de extensão. Por fim, é descrito e analisado o projeto de prolongamento do quebra-mar do Porto de Leixões, dando especial atenção à metodologia construtiva. Prevê-se que este projeto se inicie no segundo semestre de 2021 e que tenha uma duração aproximada de 30 meses. Após uma análise cuidada dos resultados das campanhas de prospeção, averigua-se que o trecho onde se vai realizar a obra apresenta uma espessa camada de aluviões sobre um maciço maioritariamente xistento. A metodologia construtiva mais adequada é a empreitada mista (via marítima e terrestre) devido às cotas definidas no projeto.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Port of Leixões, Harbour Geotechnics, Port Development, Coastal Engineering

Abstract

Harbour structures currently play a role that directly contributes to economic activity and job creation at a regional level. In this context, APDL has carried out in recent years actions of reform, restructuring and modernization of its port area in order to be able to respond to all kinds of challenges that are arising, as well as to all those assumed in the medium to long-term. The present work will focus on the construction processes and methodologies inherent to one of these actions, namely the requalification project concerning the extension of the Port of Leixões outer breakwater. The main unfavourable events that interact with this type of works are listed and described, especially those correlated with maritime agitation. Prior to the analysis of the case study, the historical evolution of this port is described, from its construction to the present day. The framing of the work is carried out through the analysis of the geomorphology, geology, and geotechnics of the site of intervention. In order to obtain an accurate geologic-geotechnical framework, the in situ investigations campaigns carried out by Tecnasol, Geoma, UA, Geosub and Argonvia firms were analysed. The protection structures commonly implemented in a port are presented, and the rubble mound breakwater construction process is shown; type of structure selected for the extension project. Finally, the extension project of the Port of Leixões outer breakwater is described and examined, giving special attention to the construction methodology. This project is expected to start in the second half of 2021 and will have an approximate duration of 30 months. After careful analysis of the in situ campaigns results, it is concluded that the stretch where the work will be carried out presents a thick alluvium layer over bedrock mostly comprising schistose rocks. The most suitable construction methodology is the mixed contract (sea and land) due to the elevations set out in the project.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução	3
2. Enquadramento do Tema e Objetivos	7
2.1. Enquadramento do Tema	7
2.2. Objetivos.....	10
3. Estado da Arte	15
3.1. Características Gerais da Agitação Marítima e Influência das Marés	15
3.1.1. Mecânica das Ondas	15
3.1.2. Eventos Associados à Agitação Marítima	18
3.1.3. Análise da Agitação.....	22
3.1.4. Onda de Projeto.....	23
3.2. Tipos de Quebra-mares	23
3.2.1. Introdução	26
3.2.1.1. Quebra-mar de Taludes.....	27
3.2.1.2. Quebra-mar de Paredes Verticais	28
3.2.1.3. Quebra-mar Misto	28
3.2.1.4. Quebra-mar de Estrutura Mista	29
3.2.1.5. Quebra-mar Submerso	30
3.2.1.6. Quebra-mar Flutuante.....	31
3.2.2. Seleção da Tipologia de Quebra-mar	31
3.3. Quebra-mar de Taludes.....	33
3.3.1. Traçado e Geometria	33
3.3.2. Dimensionamento	36
3.3.3. Estabilidade do Manto Resistente.....	39
3.3.3.1. Fórmula de Hudson	42
3.3.3.2. Fórmula de van der Meer	45
3.3.3.3. Ensaio em Modelo Reduzido	47
3.3.4. Tipos de Ruína e Fenómenos Associados.....	48
3.3.5. Fase de Construção	50
3.3.5.1. Sequência Construtiva	51
3.3.5.2. Empreitada por Via da Utilização de Equipamento Terrestre.....	52
3.3.5.3. Empreitada por Via da Utilização de Equipamento Marítimo.....	53
3.3.5.4. Empreitada por Via da Utilização de Recursos Terrestres e Marítimos.....	54
3.3.5.5. Monitorização e Preservação	55
3.4. Dragagem	56
3.4.1. Metodologia e Critérios de Implementação.....	56
3.5. Desmonte	57
3.5.1. Desmonte Subaquático	57
3.6. Utilização de Quebra-mares em Outras Infraestruturas Portuárias	59
3.6.1. Antigo Porto de Alexandria, Egito	60
3.6.2. Porto de Viana do Castelo, Portugal.....	61
3.6.3. Porto de Sines, Portugal	62
3.6.4. Novo Porto da Corunha, Espanha	66
3.6.5. Porto de Gijón, Espanha	68
4. Caso de Estudo: Extensão do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões	73
4.1. História e Importância do Porto de Leixões	73
4.2. Modernização das Estruturas Portuárias	83

4.2.1.	Ocupação de Novas Áreas no Espaço Marítimo	85
4.2.2.	Importância da Geologia e da Geotecnia.....	86
4.3.	Enquadramento Geográfico e Descrição do Projeto.....	87
4.3.1.	Conceção do Quebra-mar Exterior: Descrição e Enquadramento Geral da Estrutura ..	90
4.3.2.	Solução Estrutural e Características Gerais para a Extensão do Quebra-Mar Exterior .	93
4.4.	Enquadramento Geológico da Área Envolvente do Porto de Leixões	99
4.5.	Condições Geotécnicas da Área Interior do Porto de Leixões	102
4.5.1.	Unidades Litológicas Identificadas	106
4.5.2.	Resultados do Programa de Sondagens da Tecnasol.....	107
4.5.3.	Resultados do Programa de Sondagens da GEOMA – Terminal de Passageiros	108
4.5.4.	Resultados do Programa de Sondagens da GEOMA – Cais.....	109
4.5.5.	Resultados do Programa de Sondagens da ARGONVIA	110
4.5.6.	Levantamentos Geofísicos e Recolha de Dados para Análise	112
4.5.6.1.	Metodologia, Processamento e Interpretação da Técnica de Investigação	113
4.5.6.2.	Análise e Interpretação dos Resultados da Campanha de Prospeção Efetuada pela Universidade de Aveiro	116
4.5.6.3.	Descrição dos Resultados da Campanha de Prospeção Efetuada pela GEOSUB	120
4.5.7.	Descrição do Estudo Efetuado pela Consulmar – Requalificação das Acessibilidades Marítimas	122
4.5.8.	Síntese dos Resultados Obtidos nas Campanhas de Prospeção	123
4.6.	Quebra-mar Exterior do Porto de Leixões	125
4.6.1.	Dimensionamento dos Mantos Resistentes.....	125
4.6.2.	Fase de Construção	126
4.6.2.1.	Áreas Abrangidas pela Empreitada	126
4.6.2.2.	Estaleiros e Estruturas Provisórias de Apoio à Obra	127
4.6.2.3.	Metodologia Construtiva e Principais Operações	127
4.6.2.4.	Principais Procedimentos Construtivos a Adotar na Obra	129
4.6.2.4.1.	Pré-fabricação dos Blocos de Betão	129
4.6.2.4.2.	Colocação dos Enrocamentos do Núcleo	129
4.6.2.4.3.	Colocação dos Enrocamentos dos Sub-mantos	130
4.6.2.4.4.	Colocação dos Blocos de Betão do Manto de Proteção.....	131
4.6.2.4.5.	Execução da Cabeça de Inverno Provisória.....	131
4.6.2.4.6.	Execução do Maciço de Coroamento	132
4.6.2.5.	Programação Temporal.....	132
4.6.2.6.	Manutenção da Estrutura de Proteção	133
5.	Conclusões	137
5.1.	Considerações Conclusivas.....	137
5.2.	Apreciações Gerais e Desenvolvimentos Futuros	139
6.	Referências Bibliográficas	143
Anexos.....	151

Índice de figuras

Figura 1 – Mapa de densidade das rotas percorridas por todos os navios no Espaço Marítimo mundial, durante o ano de 2017 (Fonte: https://www.marinetraffic.com/ ; consultado em fevereiro de 2019).....	7
Figura 2 – Diferentes categorias de ondas oceânicas em função das suas frequências características e da energia associada a cada uma dessas frequências.....	16
Figura 3 – Características de uma onda convencional (adaptado de USACE, 2015).....	17
Figura 4 – Tipos de onda convencionais (Costa, 2017).	17
Figura 5 – Fenómenos de difração (à esquerda) e refração (à direita) de uma onda de água (adaptado de Gomes, 2017).....	19
Figura 6 – Classes de rebentação (Costa, 2017).....	21
Figura 7 – Ilustração esquematizada das modificações anuais da maré astronómica e do influxo da Lua e do Sol nestas (Fonte: www.poseidon.pt/meteorologia/as-mares/ , consultado em setembro de 2019).....	22
Figura 8 – Ilustração de um quebra-mar em taludes convencional (Taveira, 2001).....	27
Figura 9 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar em taludes (Taveira, 2010).....	27
Figura 10 – Ilustração de um quebra-mar vertical convencional (Taveira, 2010).....	28
Figura 11 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar vertical convencional (Taveira, 2010).....	28
Figura 12 – Ilustração de um quebra-mar misto convencional (Taveira, 2001).....	29
Figura 13 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar misto convencional (Taveira, 2010).....	29
Figura 14 – Ilustração de um quebra-mar de estrutura mista convencional (Taveira, 2001).....	30
Figura 15 – Ilustração de um quebra-mar submerso convencional (Taveira, 2001).....	30
Figura 16 – Tipos de quebra-mares: a) quebra-mar de parede vertical; b) quebra-mar misto; c) quebra-mar de taludes; d) quebra-mar submerso; e) quebra-mar de estrutura mista (com superestrutura e muro-cortina) (adaptado de Pita, 1986).....	31
Figura 17 – Ilustração de um quebra-mar flutuante (Taveira, 2001).	31
Figura 18 – Traçado em planta de um quebra-mar de taludes convencional dividido nos seus três setores principais (Costa, 2017).	34
Figura 19 – Modelo de solução convencional para o traçado de um quebra-mar destinado a proteger uma infraestrutura portuária, em função da direção predominante da agitação marítima (adaptado de Costa, 2017).	34
Figura 20 – Parâmetros estruturais de um quebra-mar de taludes convencional (CIRIA et al., 2007).	36
Figura 21 – Organograma que contempla todas as fases de um projeto de execução e operacionalidade de um quebra-mar de taludes (Pita, 1985).	38
Figura 22 – Esquematização do comportamento da força estabilizante F_G e das forças instabilizantes F_D e F_L , em interação com os blocos que configuram a secção do manto resistente de uma estrutura de proteção (adaptado de CERC, 1984).	40
Figura 23 – Interação dos principais fenómenos de agitação marítima associados à ruína de um quebra-mar de taludes (adaptado de CIRIA et al., 2007).....	48
Figura 24 – Esquematização dos fenómenos de colapso típicos de uma estrutura de quebra-mar em taludes (adaptado de USACE, 2015).....	49
Figura 25 – Encadeamento construtivo de uma estrutura de quebra-mar em taludes consoante o tipo de equipamento utilizado (adaptado de CIRIA et al., 2007).....	52
Figura 26 – Representação da largura mínima do coroamento com o cruzamento de alguns modelos de equipamentos terrestres utilizados na implementação de um quebra-mar de taludes (CIRIA et al., 2007).....	53
Figura 27 – Esquematização de todo o encadeamento construtivo de um quebra-mar de taludes por camadas por via da utilização de recursos terrestres e marítimos (Costa, 2017).	55

Figura 28 – Esquematização de um processo convencional de desmonte subaquático após se ter procedido ao aprofundamento do canal aquático por dragagem (adaptado de Lima, 2008).....	59
Figura 29 – Representação de um perfil-tipo de um plano de fogo utilizado em desmonte subaquático (adaptado de Lima, 2008).....	59
Figura 30 – Ilustração do antigo porto de Alexandria, com o <i>Portus Eunostus</i> à esquerda e o Grande Porto de Alexandria à direita (<i>Portus Magnus</i>) resguardado por dois quebra-mares em taludes de enrocamento (Fonte: https://www.guiageografico.com/egito/alexandria/antiguidade.htm , consultado em setembro de 2020).	61
Figura 31 – Ilustração aérea do porto de Viana do Castelo, onde se pode visualizar o quebra-mar de taludes a norte, com 2 100 metros de extensão e que alberga esta infraestrutura portuária (LNEC, 2009).	62
Figura 32 – Ilustração do Molhe Oeste do Porto de Sines, de tipologia em taludes, localizado na área do terminal de carga geral (Teixeira, 2012).	63
Figura 33 – Ilustração do Molhe Este do Porto de Sines, de tipologia em taludes, localizado na área do terminal de contentores (Teixeira, 2012).	63
Figura 34 – Ilustração do perfil transversal do quebra-mar oeste (<i>Port Sines Investigating Panel</i> , 1982).	64
Figura 35 – Ilustração e identificação dos setores requalificados e por requalificar do Molhe Oeste do Porto de Sines (Reis et al., 2011).....	65
Figura 36 – Ilustração do novo porto exterior de <i>Punta Langosteira</i> na Corunha, Espanha (Fonte: http://www.spanishports.es/texto-diario/mostrar/971132/obras-cierre-perimetral-puerto-exterior-punta-langosteira-iniciaran-principios-2018 ; consultado em agosto de 2020).....	66
Figura 37 – Ilustração do quebra-mar norte, de tipologia mista, do Porto de <i>Punta Langosteira</i> , onde se pode observar a constituição do manto resistente deste, composto por blocos de betão cúbicos (Delft Hydraulics, 2004).....	67
Figura 38 – Imagem aérea do Porto de Gijón após o término das obras de ampliação executadas no interior da sua área jurisdicional (Contratas, 2018).....	69
Figura 39 – Planta geográfica da barra da cidade do Porto (segundo Maldonado, 1789: in Cleto, 1998).	74
Figura 40 – Porto de Leixões: planta geral e perfis-tipo segundo os diversos projetos que foram elaborados por diferentes Engenheiros nacionais e estrangeiros. S/d. Arquivo da APDL (adaptado de Cleto, 1998).	75
Figura 41 – Ilustração da doca nº 1 no Porto de Leixões em meados dos anos 40 do século XX (adaptado de Rodrigues, in: http://flickr.com).	77
Figura 42 – Mapa em planta onde se pode observar precisamente o local onde foi implantada a doca nº 1 e a doca nº 2, respetivamente (adaptado de APDL, 2015).....	77
Figura 43 – Desenvolvimento da área portuária comercial de Leixões entre as décadas de 1930 e 1990 (adaptado de Freitas, 2009).	78
Figura 44 – Ilustração das áreas integrantes da Plataforma Logística de Leixões com a localização de alguns dos centros logísticos explorados por algumas empresas e o perímetro de acessibilidades disponível para a transladação ou receção de carga comercial. (Fonte: https://www.transportesenegocios.pt/leixoes-inaugura-plataforma-logistica-dia-29/ , consultado em abril de 2020).	79
Figura 45 – Imagem do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, onde se pode observar atracado o maior navio de cruzeiros de sempre que este porto acolheu até à data, em Setembro de 2018 (Fonte: apdl.pt , consultado em abril de 2020).....	80
Figura 46 – Evolução esquematizada da área portuária de Leixões desde a sua constituição até à atualidade (adaptado de Cleto, 1998).	81
Figura 47 – Implementação geral do projeto de melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões (adaptado de Consulmar/Nemus, 2018).....	82
Figura 48 – Ilustração aérea da infraestrutura portuária de Leixões (Fonte: apdl.pt , consultado em abril de 2020).	82
Figura 49 – Ilustração do mapa atual do Porto de Leixões com a agregação de todas as infraestruturas relevantes que fazem parte do seu modelo operacional e comercial, bem como o	

circuito de acessibilidades fundamental envolvente a esta infraestrutura portuária (adaptado de https://www.apdl.pt/mapa-do-porto , consultado em abril de 2020).	83
Figura 50 – Imagem aérea do Porto de Sines à esquerda e do Porto de Leixões à direita (Fontes: Logística & Transportes Hoje, 2018; Bento, 2018).	84
Figura 51 – Vista panorâmica da entrada do Porto de Leixões e do extremo norte da praia de Matosinhos (Google Earth, 2020).	88
Figura 52 – Localização e extensão prevista, em metros, que irá ser implementada na extremidade do atual quebra-mar exterior de Leixões (APDL, 2019).	90
Figura 53 – Quebra-mar de Casablanca que serviu de base para o dimensionamento e implementação do quebra-mar submerso na sequência do desmoronamento do quebra-mar vertical norte (Fonte: Alamy, 2019).	91
Figura 54 – Imagem da extremidade do quebra-mar exterior onde se pode ver o Posto de Acostagem A (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).	92
Figura 55 – Imagem da extremidade do quebra-mar exterior visivelmente deteriorado onde se pode visualizar o Posto de Acostagem A (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).	93
Figura 56 – Molhe Norte do Porto de Leixões (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).	94
Figura 57 – Localização da área de integração do projeto de extensão do quebra-mar exterior, acessos à obra, estaleiro e zona de <i>stock</i> de enrocamentos (Nemus, 2018).	99
Figura 58 – Enquadramento panorâmico das 3 áreas definidas para o estudo e execução do levantamento cartográfico que foi implementado (adaptado de Teixeira & Costa, 1957).	100
Figura 59 – Litologia presente na área periférica terrestre a norte e sul do Porto de Leixões, desde o Farol de Leça até ao Forte de S. Francisco Xavier (adaptado de Teixeira & Costa, 1957).	101
Figura 60 – Disposição do Porto de Leixões na Carta Geológica do concelho de Matosinhos (segundo Teixeira & Costa, 1957 in: Guerra, 2010).	102
Figura 61 – Posicionamento das sondagens executadas no âmbito da campanha de prospeção no Anteporto e no canal de acesso à Doca nº 4 do Porto de Leixões (adaptado de Tecnasol, 2004; in Pacheco, 2014).	104
Figura 62 – Posicionamento dos furos das sondagens executados na campanha realizada em 2009 no âmbito do projeto de construção do Terminal de Passageiros do Porto de Leixões (Molhe Sul) (Pacheco, 2014).	105
Figura 63 – Posicionamento dos furos das sondagens executados na campanha realizada em 2009 no âmbito do projeto de construção do Cais do Porto de Leixões (Molhe Sul) (Pacheco, 2014).	105
Figura 64 – Distribuição espacial de todos os furos de sondagens realizados na área da APDL e integrados na carta geológica do Porto de Teixeira & Costa 1957 (segundo Pacheco, 2014).	110
Figura 65 – Horizontes geotécnicos definidos pela Argonvia para a bacia portuária e canal de acesso ao Porto de Leixões (ARGONVIA, 2019).	111
Figura 66 – Princípio de base do método de reflexão sísmica (Ashcroft, 2011).	114
Figura 67 – Implementação do sistema de sonar CHIRP Edgetech 512i (Fonte: http://www-udc.ig.utexas.edu/external/facilities/subbottom/ , consultado em junho de 2020).	115
Figura 68 – Configuração geral de um sistema de reflexão sísmica de alta resolução (adaptado de: https://pubs.usgs.gov/pp/p1634/jf_scan.htm , consultado em junho de 2020).	116
Figura 69 – Localização das linhas sísmicas da campanha de prospeção indireta (Pacheco, 2014).	117
Figura 70 – Localização das linhas sísmicas com base no posicionamento dos furos de sondagem referentes à campanha de prospeção semidireta realizada previamente, em coordenadas UTM (Pacheco, 2014).	118
Figura 71 – Porção da linha sísmica “t8” (Pacheco, 2014).	118
Figura 72 – Extensão total da superfície, ilustrada a violeta, sobre a qual incidiu o estudo geofísico adstrito pela APDL (Geosub, 2017).	121
Figura 73 – Imagem de um pontão do tipo “jack-up” utilizado na reabilitação de estruturas costeiras (Fonte: https://www.workboatsales.com/vessel/24m-modular-jack-up-pontoon-for-sale-or-charter/ , consultado em outubro de 2019).	133

(página propositadamente em branco)

Índice de quadros

Quadro 1 – Principais condicionantes a ter em conta no processo de análise para a execução de uma estrutura de quebra-mar convencional (adaptado de Castro, 2018).	25
Quadro 2 – Principais funções de alguns elementos integrantes de um quebra-mar de taludes.	35
Quadro 3 – Tipologia dos principais tipos de blocos artificiais de betão existentes com a indicação da data de criação dos mesmos e da origem destes (Bakker et al., 2003).	39
Quadro 4 – Esquematização das principais tipologias de blocos em betão, segundo o seu padrão de colocação (regular ou irregular), o número de camadas do manto resistente para os quais os mesmos são apropriados, a sua geometria e os fatores que lhes conferem a estabilidade (adaptado de CIRIA et al., 2007).	39
Quadro 5 – Valores dos fatores S e N_{od} , para diferentes classes de blocos.	42
Quadro 6 – Valores de D_n para diferentes tipos de blocos em função da sua altura, D_i	43
Quadro 7 – Valores característicos do coeficiente de estabilidade (K_D) para diferentes tipos de blocos.	45
Quadro 8 – Número de dano característico N_{od} para elementos de tetrápodes consoante o nível de dano particular (CIRIA et al., 2007).	47
Quadro 9 – Referências da obra executada no Porto de Gijón (adaptado de www.puertogijon.es/ , consultado em agosto de 2020).	70
Quadro 10 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Tecnasol.	108
Quadro 11 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Geoma no âmbito do projeto de implementação do Terminal de Passageiros.	109
Quadro 12 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Geoma no âmbito da obra de implementação do Cais de Leixões.	109
Quadro 13 – Resumo dos tipos e quantidades de trabalhos realizados na campanha de prospeção da Argonvia (ARGONVIA, 2019).	111
Quadro 14 – Número de traços contidos em cada linha sísmica, em particular (Pacheco, 2014).	119
Quadro 15 – Classe de material dragado e respetivas quantidades (adaptado de Consulmar, 2017; Silva, 2018).	123
Quadro 16 – Valores do dimensionamento do manto resistente (Consulmar/Nemus, 2018).	126
Quadro 17 – Densidade de distribuição dos blocos Antifer (Consulmar/Nemus, 2018).	126

(página propositadamente em branco)

Índice de símbolos

- A_c** Altura livre acima do nível da superfície da água até à cota do coroamento da estrutura ou do seu manto resistente, relativamente ao nível de repouso
- B** Largura do coroamento; largura da berma
- B_a** Largura do topo do manto resistente
- B_c** Largura da superestrutura no topo do elemento
- c** Celeridade da onda
- d** Profundidade de água de projeto em PM_{av} para a teoria de onda solitária; distância; altura do coroamento em relação ao fundo ou à base de uma estrutura
- d_c** Altura de onda incidente
- d_{ca}** Diferença de cotas entre o topo do muro-cortina e o topo do manto resistente
- D_i** Altura do bloco
- D_{máx}** Dimensão máxima
- D_n / D** Diâmetro nominal dos blocos
- D_{n50}** Diâmetro nominal médio do material
- d_p** Altura entre a superfície livre da água e a fundação do quebra-mar
- F** Grau de fraturação
- F_D** Força de arrastamento
- F_G** Força gravítica
- F_L** Força de levantamento
- FS** Fator de segurança
- g** Aceleração gravítica
- h** Profundidade no pé da estrutura costeira
- h_t** Profundidade da risberma do elemento costeiro relativamente ao nível de repouso
- H** Altura de onda incidente
- H_s** Altura significativa de onda marítima
- H_{1/3}** Altura média do terço superior das alturas de onda registadas
- H_{1/10}** Altura média do décimo superior das alturas de onda registadas
- H:V** Razão entre a horizontal e a vertical
- K_D** Coeficiente de estabilidade de Hudson
- m₀** Momento espectral de primeira ordem
- M₅₀** Massa mediana do enrocamento
- N** Número de ondas marítimas em função de uma condição mais desfavorável como um temporal
- N_{od}** Nível de dano em elementos de proteção em betão

N_s	Número de estabilidade
N_{SPT}	Número de golpes necessários para a cravação de amostrador de sondagem à percussão
P	Porosidade do material que constitui o talude da estrutura costeira
Q	Caudal médio de galgamento
R_c	Altura livre do coroamento do quebra-mar, relativamente ao nível de repouso
S	Dano do elemento costeiro
S_d	Dano em mantos resistentes de enrocamento
T	Período de retorno
t_a	Espessura do manto resistente
t_f	Espessura do filtro do elemento costeiro
t_u	Espessura do submanto e filtro
v	Velocidade de pico do escoamento
W	Grau de alteração
W₅₀	Peso mediano do enrocamento

Alfabeto grego

α	Ângulo que o talude da estrutura costeira faz com a horizontal
Δ	Massa ou densidade volúmica relativa
ξ	Número de Iribarren
ξ_{cr}	Número de Iribarren crítico
ξ_m	Número de Iribarren médio
γ_{betão}	Peso volúmico do betão
ρ	Massa volúmica de um determinado material
ρ_c	Massa volúmica do bloco de betão
ρ_r	Massa volúmica do enrocamento
ρ_w	Massa volúmica da água
ρ_m	Massa volúmica do material que compõe o manto resistente da estrutura costeira

Índice de acrónimos ou abreviaturas

a.C. – Antes de Cristo

AGA – Annual General Assembly

AIA – Avaliação de Impacte Ambiental

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

APDL – Administração do Porto do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A.

API – Application Programming Interface

APS – Administração dos Portos de Sines e do Algarve

BM_{av} – Baixa-Mar de Águas-Vivas

BS – British Standard

CEM – Coastal Engineering Manual

CETMEF – Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

CERC – Coastal Engineering Research Centre

CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar

CHIRP – Compressed High Intensity Radar Pulse

CIRIA – Construction Industry Research and Information Association

CXG – Complexo Xisto-Grauváquico

DIA – Declaração de Impacte Ambiental

DOPS – Direção de Operações Portuárias e Segurança

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FGE – Fundações e Geotecnia de Engenharia

GR – Granito

IAPH – International Association of Ports and Harbors

IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISRM – International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PEDPL – Plano Estratégico de Desenvolvimento do Porto de Leixões

PIANC – World Association for Waterborne Transport Infrastructure

PM_{av} – Preia-Mar de Águas-Vivas

PT – Perfil transversal

REFER – Rede Ferroviária Nacional

Ro-Ro – Roll-on/Roll-off

RQD – Rock Quality Designation

RSAR – Reflexão Sísmica de Alta Resolução

SAPO – Sistema Autónomo de Predicção de Oleaje

SPM – Shore Protection Manual

SPT – Standard Penetration Test

SPW – Seismic Processing Workshop

SVL – Sonar de Varrimento Lateral

TEU – Twenty-foot Equivalent Unit

TOT – Enrocamento de “Todo-o-Tamanho”

TWT – Two-Way Time

UA – Universidade de Aveiro

UCS – Uniaxial Compressive Strength

USA – United States of America

USACE – United States Army Corps of Engineers

UTM – Universal Transverse Mercator

VCP – Via de Cintura Portuária

VILPL – Via Interna de Ligação ao Porto de Leixões

VRI – Via Regional Interna

W.E.S. – Waterways Experiment Station

ZH – Zero Hidrográfico

ZHL – Zero Hidrográfico de Leixões

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

A História de Portugal está e perdurará ligada indelevelmente ao mar, primeiramente por todo o passado marítimo do país e, juntamente, por todos os hábitos, proezas, progresso e prosperidade que foram alcançados pela exploração e proveito deste espaço.

É impossível pensar-se em Portugal sem meditar em todas as façanhas relacionadas com a sua história marítima, bem como em todas as consequências positivas que se vieram a testemunhar e a evidenciar durante o período dos Descobrimentos, com grande contributo para a expansão territorial e para outros importantes avanços da tecnologia e da ciência náutica. Estas proezas serviram também de impulso para o desenvolvimento dos primeiros navios com capacidade de navegação fora do comum, dentro dos parâmetros de segurança, requeridos em mar aberto àquela época.

Além disso, a exploração do espaço marítimo por parte dos portugueses teve desde sempre uma grande relevância no estímulo da economia nacional, bem como impeliu a que esta criasse condições de grande desenvolvimento e prosperidade durante um longo período de tempo a partir da Idade Média. O acentuado abrandamento da mesma nos últimos séculos, tendo em conta a influência da globalização marítima que se veio a impor, levou à remoção de Portugal do púlpito náutico que tinha mantido durante centenas de anos (Robinson, 2009).

Por isso, e dentro do contexto mencionado associado à economia marítima nacional, os portos sempre se vieram a predispor como infraestruturas físicas fundamentais dentro do enquadramento de dinamização das relações *hinterland/foreland*.

Por outro lado, tem-se assistido nas últimas décadas a um aumento do transporte marítimo, havendo a obrigatoriedade de serem melhoradas não só as instalações portuárias existentes como também de reabilitar outras estruturas constituintes, ou associadas, aos portos.

Foi por isso, e neste contexto, que surgiu o interesse pessoal pelo estudo, dinamização e reabilitação de estruturas portuárias; trata-se de uma área multidisciplinar para a formação de engenheiro geotécnico. A mesma abrange e conjuga conhecimentos dentro de diversos domínios, entre eles a logística, gestão e a instrumentalização portuária, meteorologia, hidráulica, condições geotécnicas, estruturas e topografia, bem como o ramo associado a fenómenos com impacte ambiental. Este último é um desafiante ramo de estudo prioritário, cada vez mais alvo de uma solicitude e caracterização holista tendo em conta todos os impactos adversos associados ao não respeito e preservação dos ecossistemas.

Além disso, todo o estudo de investigação circundante à especialidade de engenharia costeira envolve igualmente, por múltiplas razões como já referido, a análise e ponderação de todas as questões gerais inerentes ao planeamento, gestão e desenvolvimento de infraestruturas deste

nível, particularmente todo o tipo de obras estruturais comuns interligadas com estes objetivos. Por se tratarem de empreitadas por vezes de grande peculiaridade, e no âmbito de estarem sujeitas durante a sua vida útil a fenómenos muito característicos essencialmente interligados à dinâmica das marés e da agitação marítima, estas requerem a contemplação de inúmeras variáveis técnicas de índole científica.

Assim sendo, e dentro de todo este retrato exposto, esta dissertação vai-se focalizar sobretudo no estudo de uma dessas obras, nomeadamente a futura empreitada de requalificação do quebra-mar exterior de Leixões, assim como no estudo de todos os critérios que envolvem a implantação e a operacionalidade póstera da nova infraestrutura. Portanto, este estudo envolve não só uma exposição de toda a componente geomorfológica, geológica e geotécnica da região onde se vai realizar a intervenção, como também uma abordagem de todos os conteúdos técnicos, mencionados supra, correlacionados com este projeto. A metodologia construtiva idealizada para a intervenção prevê a demolição da atual cabeça do molhe exterior norte e a ampliação do quebra-mar exterior em cerca de 300 metros, entre outras obras correlacionadas com a mesma e que irão decorrer paralelamente a esta. Serão efetuadas dragagens no canal de entrada e na bacia de rotação que irão servir não só como complemento de apoio à execução da obra em estudo, como também vão ter um papel essencial na melhoria das acessibilidades marítimas e de segurança com o propósito de aumentar a competitividade portuária deste porto.

O projeto de extensão do quebra-mar mar exterior de Leixões será levado a cabo pela Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL).

Capítulo II

Enquadramento do Tema e Objetivos

(página propositadamente em branco)

2. Enquadramento do Tema e Objetivos

2.1. Enquadramento do Tema

O mar é essencial para o bem-estar e para a sobrevivência das gerações futuras e, por isso, no que concerne à exploração deste espaço, deve ser tido em conta um modelo de ponderação baseado numa correlação benefícios/inconvenientes que deve ser a mais racional possível. O aproveitamento deste ambiente, além de representar uma oportunidade rara para o desenvolvimento de qualquer nação rodeada por um oceano tão vasto, acaba por ser igualmente um desafio enorme pela importância que este ecossistema tem para a subsistência humana.

Num passado longínquo, os povos estavam separados pelo mar, mas a partir dos últimos séculos é o próprio que os aproxima e lhes fornece recursos, prestígio e competitividade convergente. Além disso, desde sempre que as comunidades se fixaram maioritariamente junto de faixas costeiras marítimas ou mesmo de rios. Ainda hoje, a exemplo disso, os relatórios estatísticos indicam que mais de 60% da população portuguesa vive a cerca de 25 quilómetros da costa (Roca e Pimentel, 2003).

Alguns dos principais fatores que originaram invariavelmente esta “moda” basearam-se maioritariamente em ocupações relacionadas com a pesca, com a procura de recursos essenciais, e também com o transporte de mercadorias, turismo e operações militares.

Já no século XX, e após o final da 2ª Guerra Mundial, verificou-se ademais um *boom* expressivo no crescimento do comércio marítimo mundial, tendo este vindo a acentuar-se apreciavelmente até à atualidade, como se pode verificar na Figura 1.

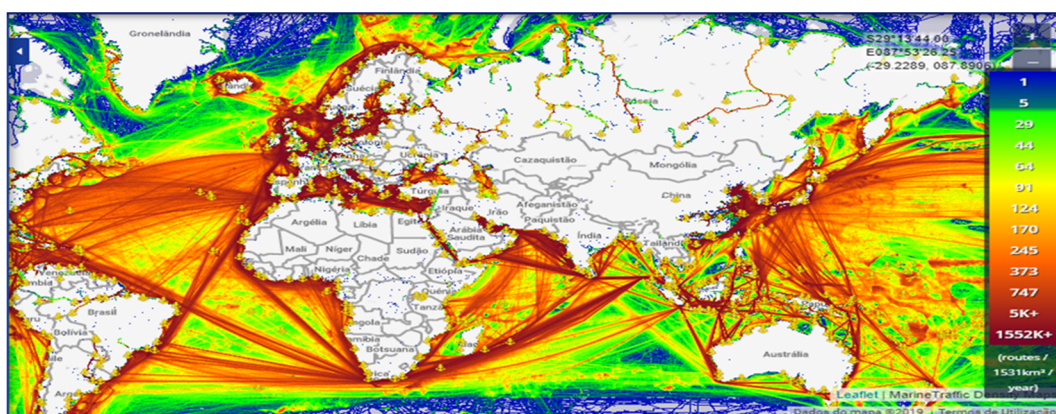


Figura 1 – Mapa de densidade das rotas percorridas por todos os navios no Espaço Marítimo mundial, durante o ano de 2017 (Fonte: <https://www.marinetraffic.com/>; consultado em fevereiro de 2019).

Por isso, com a forte expansão do tráfego marítimo mundial, surgem também todas as exigências inerentes a este cenário, sendo estas muito condicionadas ao nível de inúmeros fatores, particularmente de prazos, de operacionalidade, de expensas e de exigências ambientais. Sendo assim, e para uma melhor resposta ao aumento de todas estas necessidades que cada vez mais se

têm vindo a sobrepôr, é conveniente e indispensável que as infraestruturas portuárias venham a ser dotadas de melhores condições, particularmente ao nível de estruturas logísticas, de acessibilidades e de serviços.

Tendo em conta este enquadramento, segundo Patrick Verhoeven (diretor-geral de política e estratégia do IAPH – *International Association of Ports and Harbors*), em entrevista para a revista “*Terra et Aqua*” (2018), o aumento do tamanho dos navios é atualmente uma tendência global, cada vez mais propensa a amplificar-se no futuro próximo. Este panorama tem interferências óbvias na gestão e no desenvolvimento das infraestruturas portuárias, nomeadamente na articulação destas às tipologias de navios existentes e vice-versa.

Por isso, ao longo da progressão dos tempos, estas entidades têm vindo a implementar algumas medidas retificativas importantes englobadas num conjunto de ações de reforma estruturais elementares, sendo as mais relevantes:

- Melhoria/Construção de canais de aproximação aos portos e à área da bacia de manobras destes;
- Dragagem dos fundos adjacentes aos cais de acostagem;
- Construção/Reabilitação das estruturas de acostagem e amarração;
- Construção/Melhoria de acessibilidades;
- Aumento/Construção de terraplenos;
- Construção/Prolongamento de quebra-mares;
- Construção de novas infraestruturas portuárias (Castro, 2018).

É precisamente com base numa destas ações de reestruturação (Construção/Prolongamento de quebra-mares), que a APDL lançou no dia 22 de Fevereiro de 2019 um concurso público com vista ao prolongamento do quebra-mar exterior já existente neste porto, em cerca de 300 metros, com o objetivo de dotar o Porto de Leixões de melhores condições ao nível de acessibilidades marítimas e ao nível de condições de navegabilidade à entrada do Anteporto.

O projeto do “Prolongamento do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões” será levado a cabo e implementado na zona norte desta infraestrutura, localizada dentro do perímetro de jurisdição do Porto de Leixões, que por sua vez se situa na União das freguesias de Matosinhos e Leça da Palmeira, no concelho de Matosinhos.

Com a concretização desta obra é expectável que o Porto de Leixões se torne numa infraestrutura ainda mais competitiva no *import/export*, principalmente pelo facto de se prever, após a extensão do atual quebra-mar exterior, um acentuado acréscimo não só ao nível da operacionalidade portuária deste organismo como também em termos da melhoria das condições de segurança.

Além da ampliação da atual estrutura de proteção, estão previstos igualmente outros projetos em que as empreitadas respeitantes a estes deverão decorrer simultaneamente dentro deste porto. Mais concretamente, as dragagens de sedimentos que irão ser efetuadas no canal de entrada e na bacia de rotação e desmontes de rocha com recurso a dragas de corte e sucção, a construção do novo Terminal de Contentores na zona sul, a requalificação do Porto de Pesca, bem como algumas operações de implementação de outras componentes associadas ao projeto de execução das “Acessibilidades Marítimas do Porto de Leixões”.

Estas obras complementares à extensão do quebra-mar têm, da mesma forma que a anterior, o intuito de prover este porto de melhores condições de acesso e de operacionalidade de forma ainda mais substancial (Consulmar/Nemus, 2018).

Adicionalmente, tanto a reabilitação do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, como também a renovação das acessibilidades marítimas desta infraestrutura, irão agregar ainda mais opções para o acesso e receção de navios de carga de maior dimensão, já que atualmente o Porto de Leixões não consegue dar uma resposta eficiente às exigências de quase metade de toda a frota mundial de navios porta-contentores. Presentemente não existem condições satisfatórias de admissão por via marítima, não só para este tipo de navios, como igualmente para uma vasta gama de outras tipologias e para uma satisfatória eficiência ao nível de controlo e processamento das suas mercadorias (Cleto, 1998).

Sendo assim, tanto a requalificação do quebra-mar exterior, como as ações de melhoria das acessibilidades que irão ser implementadas no Porto de Leixões, não só estimularão favoravelmente todo o tráfego marítimo inerente a esta infraestrutura, como também irão criar melhores condições de acesso. Alguns dos fatores mais desfavoráveis, associados às intempéries marítimas, irão forçosamente ter um menor impacto na operacionalidade deste porto (Consulmar/Nemus, 2018).

Finalmente, prevê-se que após a implementação de todas estas obras, tanto principais como complementares, se venham a verificar impactos positivos e negativos a nível económico e ambiental.

2.2. Objetivos

Dentro de todo este enquadramento exposto anteriormente, e de modo a tornar a leitura da presente dissertação clara e tangível, é apresentado de seguida um compêndio dos capítulos do presente trabalho.

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos, sendo que o inaugural se trata de um capítulo introdutório onde é apresentado o âmbito do tema deste trabalho. No segundo capítulo é apresentado o enquadramento geral da presente dissertação e onde são identificados quais os objetivos que se pretendem desenvolver.

No terceiro capítulo, correspondente ao estado da arte, é enunciada uma descrição geral relativamente aos vários tipos de fenómenos de dinâmica costeira correlacionados com a agitação marítima, tendo em conta a severidade oceânica da costa oeste portuguesa. Neste capítulo são também detalhados os vários tipos de estruturas de quebra-mares que geralmente são implantados para fins de acréscimo de segurança e proteção costeira. São apresentadas as várias tipologias de quebra-mares existentes atualmente, bem como é caracterizado o pré-dimensionamento de um quebra-mar em taludes, por ser essa a escolha estipulada para a requalificação do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

Finalmente, são apresentados os principais procedimentos construtivos previstos para a obra em causa e descritos e apreciados alguns casos de avaliação de infraestruturas e obras semelhantes ao caso de estudo principal (projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões), algumas delas localizadas em ambientes severamente energéticos como no caso do entorno costeiro de Leça da Palmeira.

O quarto capítulo é respetivo ao caso de estudo onde é efetuada uma narração acurada sobre o Porto de Leixões no que concerne as suas características integrais, estruturais e de operacionalidade, assim como no que diz respeito à afirmação a nível nacional e internacional ao longo dos anos. Adiante é feito um enquadramento genérico do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, mais especificamente da sua importância e de todas as alterações de que a estrutura foi alvo ao longo do tempo. Ademais, é efetuada uma análise acerca da estabilidade da estrutura ao longo da sua vida útil, das limitações funcionais que a mesma veio a apresentar, bem como dos inúmeros problemas de operacionalidade que se vieram a assomar, destacadamente no Posto A do Terminal de Petroleiros que fica implantado no intradorso do quebra-mar.

De seguida, é feita uma exposição preliminar de todo o envolvimento geomorfológico do território peninsular e em que é delineado um encadeamento desde o enquadramento geológico nacional até ao contexto geológico procedente que hoje se verifica em Leixões.

Posteriormente é realizada uma caracterização concisa de âmbito geológico-geotécnico e costeiro atinente ao projeto de extensão do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Na obtenção desta

informação foram consultados vários documentos e dados preexistentes, particularmente relatórios técnicos de campanhas de prospeção realizadas no Porto de Leixões e em zonas contíguas a este.

É efetuada também uma exposição convencional das várias opções de metodologia possíveis de implementação de uma estrutura de proteção costeira da categoria e configuração que se pretende prolongar no Porto de Leixões.

O quinto capítulo é o capítulo terminal em que são transmitidas as principais conclusões do estudo efetuado. Neste capítulo são abordados os benefícios intrínsecos ao projeto principal de requalificação da estrutura de proteção do Porto de Leixões e são feitas algumas recomendações no âmbito de desenvolvimentos futuros.

O objetivo desta dissertação consiste na agregação de informação de apoio ao estudo deste tipo de obras, analisando para o efeito o projeto de extensão do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Pretende-se adquirir e expor todo o conhecimento relevante acerca do enquadramento geológico-geotécnico da região, recorrendo a campanhas de prospeção efetuadas na área envolvente e integrante da infraestrutura portuária de Leixões. Após uma análise cuidada das condições geotécnicas locais pretende-se também propor a metodologia construtiva mais adequada a implementar neste projeto.

(página propositadamente em branco)

Capítulo III

Estado da Arte

(página propositadamente em branco)

3. Estado da Arte

3.1. Características Gerais da Agitação Marítima e Influência das Marés

As características das ondas geradas essencialmente ao largo de fronteiras sólidas naturais ou de estruturas de proteção costeira (e.g. quebra-mares) podem ser modificadas através de fenómenos de agitação marítima das quais estas formações estão especialmente dependentes. Com efeito, todas as fronteiras sólidas artificiais têm uma finalidade em particular: controlar a ação da agitação marítima num determinado espaço. Por isso, para um correto dimensionamento de uma estrutura de quebra-mar é necessário ter em conta que os fenómenos mais desfavoráveis que irão interferir com este tipo de elementos são os eventos interligados a condições meteo-marítimas severas.

As características das ondas e das marés estão interligadas a inúmeras circunstâncias naturais, principalmente à interação entre o vento e a superfície do mar, às interações gravitacionais entre a Terra, a Lua e o Sol e à existência de gradientes de pressão atmosférica.

Sendo assim, é primordial dispor de um conhecimento abrangente sobre a forma como cada um destes eventos poderá interagir com o estado do mar nas imediações de elementos portuários de proteção, tanto em fase de execução da estrutura marítima como durante toda a sua vida útil. Tanto a ocorrência isolada de um deles como a ocorrência de vários eventos de forma combinada poderão dar origem a solicitações preocupantes. Estas poderão ocorrer durante a fase de implementação do elemento estrutural em que alguns setores integrantes se irão encontrar temporariamente expostos à agitação marítima, e também no decurso da fase de exploração do mesmo, no caso do elemento de proteção não estar dotado de todos os requisitos adequados para sustentar este tipo de ações (Sorensen, 1997).

Ademais, o correto estabelecimento da onda de projeto será primordial para o futuro equilíbrio da solução proposta em termos do elemento de proteção costeira que se requer, pois a subavaliação deste parâmetro pode acarretar um risco acrescido para a estrutura. Já a sobreavaliação da onda de projeto implicará um acentuado aumento de custos, superior ao necessário, para que a estrutura desempenhe plenamente todas as suas funções de forma uniforme (Taveira et al., 2003).

3.1.1. Mecânica das Ondas

As estruturas de quebra-mares podem ser implantadas a diferentes profundidades. Contudo, a agitação marítima envolvente a este tipo de elementos, na forma de ondas oceânicas, pode alcançar diferentes intensidades de energia. Em função das frequências e energias associadas às ondas oceânicas, estas são categorizadas de acordo com estas duas características, como se pode observar na Figura 2. Este cenário está correlacionado com o facto de o comportamento das ondas poder ser distinto dependendo do facto destas se poderem propagar tanto ao largo de estruturas costeiras como ao largo da zona de costa.

As ondas oceânicas têm um comportamento inconstante que é baseado na sobreposição das mesmas. Sendo assim, estas atingem diferentes alturas, períodos e direções e podem ser geradas em distintas zonas do oceano. Essa situação perfaz com que exista uma relevante dificuldade em conceber um modelo de análise que caracterize de forma intrínseca o comportamento das ondas de superfície numa determinada zona de observação, sendo essencial para isso definir um padrão que individualize a sua ação para interpretar como as mesmas se irão alastrar em meio marítimo (Holthuijsen, 2007).

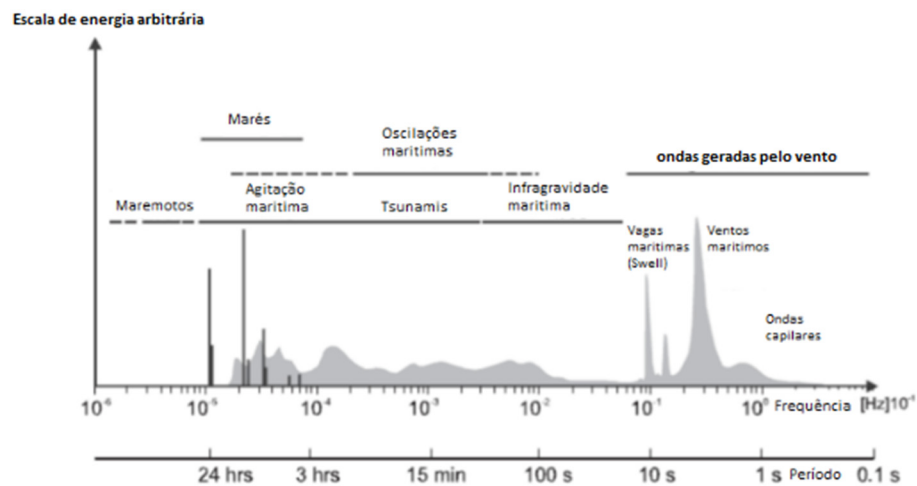


Figura 2 – Diferentes categorias de ondas oceânicas em função das suas frequências características e da energia associada a cada uma dessas frequências.

Consegue-se reconhecer que, em termos de energia associada, as ondas formadas pelo vento são de facto as mais energéticas e, por esse fundamento, as que mais condicionarão o dimensionamento de estruturas de proteção costeira (Holthuijsen, 2007).

As ondas de superfície são diferenciadas em: ondas de baixo período (3 a 9 segundos) e com cristas curtas; ondas formadas pelo vento, denominadas por vagas; ondas com períodos longos (tipicamente superiores a 10 segundos), com cristas igualmente longas e bem definidas, que normalmente se deslocam para fora da sua zona de geração e que são denominadas de ondulações (*swell*) (USACE, 2015).

Na Figura 3 podem-se observar as características de uma onda convencional.

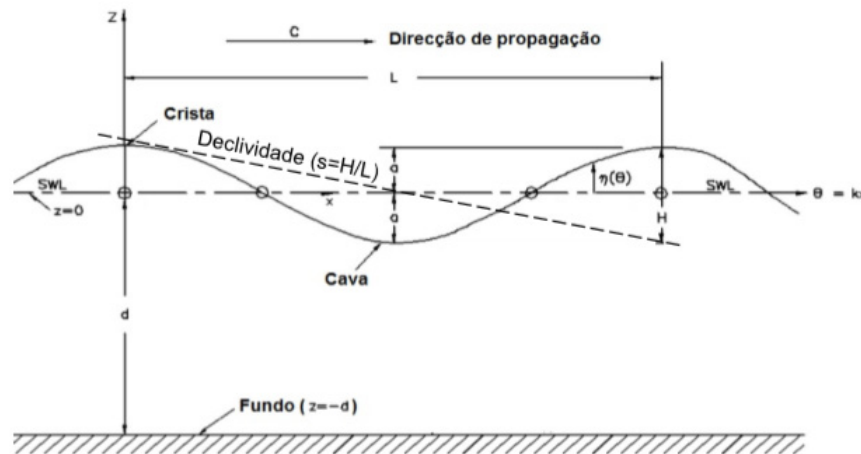


Figura 3 – Características de uma onda convencional (adaptado de USACE, 2015).

Além disso, as ondas de superfície apresentam uma grande mutabilidade de parâmetros, sendo que o aumento, ou não, da sua altura é condicionado pela velocidade do vento ao interagir com a superfície do oceano. A energia do vento é propagada pela superfície da água induzindo ao crescimento das ondas até estas atingirem o seu limite de crescimento e por fim, rebentarem (USACE, 2015).

As ondas convencionais podem classificar-se em regulares, irregulares ou aleatórias, como se pode observar na Figura 4, de acordo com a variabilidade das características demonstradas anteriormente na Figura 3.

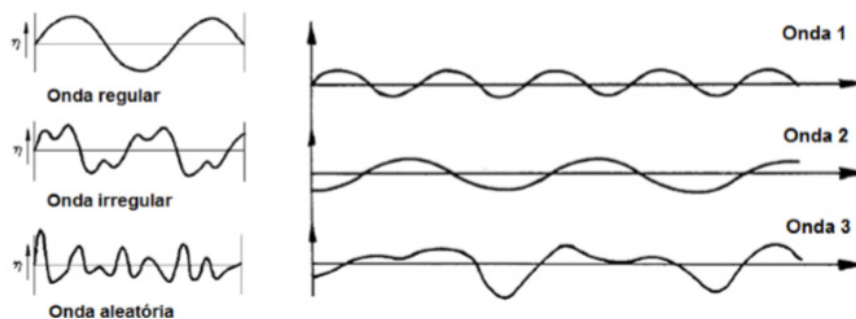


Figura 4 – Tipos de onda convencionais (Costa, 2017).

Em suma, o fenómeno de agitação marítima é um evento tipicamente não linear, sendo que existem vários critérios que servem de auxílio à caracterização da mesma. No entanto, todos esses pressupostos constituem apenas uma aproximação à realidade. É por isso conveniente, em fase de projeto de estruturas costeiras, considerar um determinado grau de incerteza na definição dos parâmetros que definem este tipo de fenómeno num determinado local de interface com a obra que se pretende implantar (Costa, 2017).

3.1.2. *Eventos Associados à Agitação Marítima*

Uma estrutura de quebra-mar pode ser implantada a diferentes cotas, e esse facto tem interferências evidentes nos tipos de fenómenos interligados com a agitação marítima que poderão ocorrer na zona onde a mesma foi fundada, dependendo se é uma área mais próxima ou mais afastada da linha de costa. O comprimento e a celeridade das ondas começam por se caracterizar em função do seu período mas, com o decréscimo da profundidade, a interação entre as ondas e o fundo do oceano tende a tornar-se cada vez mais significativa, perfazendo com que o carácter da agitação oceânica seja alterado.

Sendo assim, são múltiplos os fenómenos que podem influir com a agitação oceânica e assim promover com que esta afete a funcionalidade de qualquer estrutura costeira, principalmente eventos de refração, difração, empolamento, reflexão, transmissão ou de rebentação. Consecutivamente serão abordados alguns destes eventos de forma sintetizada.

3.1.2.1. *Refração e Difração*

Como mencionado anteriormente, as ondas marítimas são formadas por ação do vento, ou seja, pela energia do movimento de ar associado ao mesmo que, ao atingir a superfície da água, origina um processo de propulsão com este meio criando ondulações. Estes tipos de ondas são classificadas como ondas mecânicas, uma vez que é preciso que exista um meio de propagação para que estas se gerem, podendo as mesmas adquirir qualquer tipo de direção em alto mar.

No entanto, quando uma onda atinge uma faixa costeira, esta adquire uma direção de propagação perpendicular à costa, sendo que a energia da mesma, acaba assim por se dissipar de forma paralela quando esta atinge o areal. É neste âmbito que se enquadram os fenómenos de refração e difração. A refração é o fenómeno que retrata a alteração da direção de uma onda, e a encurvadura da sua crista, à medida que a mesma se move entre distintos materiais de fundo com características diferenciadas. A velocidade de propagação que uma onda adquire é dependente da profundidade do meio fluido pela qual a mesma se desloca. Sendo assim, uma onda pode por isso abranger diferentes profundidades, sendo que a mesma cresce e propaga-se mais rapidamente em águas mais profundas, e vice-versa quando a profundidade diminui. Desta forma, a velocidade de propagação de uma onda é mais lenta quando esta se aproxima da costa, provocando com que a linha da crista da mesma se deforme e se alinhe com as batimétricas.

Consegue-se observar de forma explícita o fenómeno de refração das ondas em áreas de reentrâncias costeiras, como são o caso das baías, em que se pode observar a dispersão da energia das ondas quando estas se aproximam da superfície. Por oposição, pode-se observar uma concentração de energia de ondas em cabos devido à diminuição do comprimento da crista da onda entre ortogonais, o que promove um aumento de energia por unidade de área. Os fenómenos de

refração também podem gerar-se em certos contextos específicos, particularmente com a formação de correntes em ambientes aquáticos de transição entre um rio e o mar, e.g. estuários. Já o fenómeno de difração retrata a capacidade de uma onda para contornar obstáculos. Ou seja, quando uma onda atinge uma fenda localizada num dado obstáculo comum, parte da mesma é impedida de se alastrar para além dessa barreira, surgindo na traseira da onda uma zona de sombra da propagação desta. No entanto, outra fração dessa mesma onda acabará por contornar o obstáculo. Isso ocorre devido a um fenómeno denominado de difração, já que a onda que se continua a alastrar interage com a zona de sombra originada, dando-se a transferência lateral de energia da crista da onda para essa mesma zona de sombra. Sendo assim, parte da onda original consegue atingir o lado oposto do obstáculo, adquirindo porém uma configuração circular após atravessar o mesmo.

O vão da fenda correlacionado com o comprimento de onda influencia a ocorrência do fenómeno de difração, sendo que, por essa mesma razão, quanto maior for o comprimento de onda relativamente a uma fenda existente num dado obstáculo mais intenso será esse mesmo evento (Gomes, 2017).

Na Figura 5 à esquerda está representado o fenómeno de difração de uma onda em que a mesma contorna um obstáculo rígido, adquirindo posteriormente uma trajetória circular. À direita observa-se um exemplo prático de um fenómeno de refração de ondas em que se pode constatar uma forte agitação marítima em zonas em que o nível de água é profundo, e em que se denota uma dissipação da energia das ondas à medida que as mesmas se aproximam da linha de costa por via da redução da profundidade.

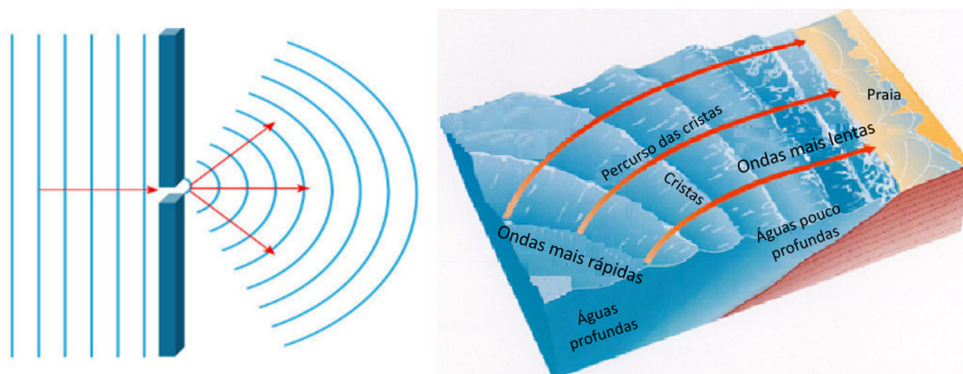


Figura 5 – Fenómenos de difração (à esquerda) e refração (à direita) de uma onda de água (adaptado de Gomes, 2017).

Relativamente ao impacto deste fenómeno em estruturas de quebra-mares existem dois cenários relevantes a ter em conta, nomeadamente o caso de ondas que intersejam a orla de um quebra-mar e o caso de ondas que se propagam através de uma abertura entre dois quebra-mares (Costa, 2017).

Em suma pode-se assim afirmar que estes dois fenómenos interferem com as alturas de onda de qualquer área marítima, nomeadamente em zonas onde estão localizadas áreas portuárias. Estas áreas requerem especial atenção, mais especificamente na manutenção e monitorização dos elementos construtivos de utilização e proteção portuária, bem como no dimensionamento ou reabilitação de outros elementos em causa, entre eles terminais, cais de acostagem, quebra-mares, etc.

3.1.2.2. *Empolamento e Rebentação*

Em termos de dinâmica marítima, o fenómeno de empolamento de onda é verificado quando, decorrente da agitação marítima, uma onda começa a crescer em correlação com o decréscimo de profundidade à medida que a mesma se aproxima da linha de costa, conservando no entanto todo o seu fluxo de energia. Pouco antes da rebentação da onda, devido às cristas da mesma se tornarem instáveis, esta atinge a sua altura máxima (CIRIA et al., 2007).

Em termos de dinâmica marítima, o fenómeno de rebentação de ondas é um evento que resulta da dissipação da energia de uma onda oceânica em que esta acaba por rebentar, fruto da instabilidade da sua crista. Essa instabilidade está normalmente interligada a dois fatores, designadamente à ação do vento ou à interação da parte subjacente da onda com o fundo sobre o qual esta se propaga, particularmente se a profundidade entre estes dois pontos decrescer.

Para efeitos de projeto de obras de proteção costeira, nomeadamente de quebra-mares, é dado um especial enfoque a este fenómeno, essencialmente quando o mesmo é provocado pela redução de profundidade e não propriamente pela influência do vento. A rebentação gerada por efeito da diminuição de altura entre a base da onda e o fundo aquático tem efeitos mais adversos, tanto ao nível de deterioração estrutural deste tipo de elementos como ao nível da sua funcionalidade durante a vida útil destes (Gomes, 1981).

Existem três tipos de rebentação convencionais: rebentação progressiva (*spilling breaker*), rebentação de fundo (*surging breaker*) e rebentação mergulhante (*plunging breaker*), representadas pela Figura 6. Destas três categorias, a rebentação mergulhante é aquela que deve ser levada mais em atenção quando se pretende implantar uma estrutura de quebra-mar em taludes, ou mesmo quando se pretende requalificar uma estrutura deste género. É um fenómeno que, perante a presença deste tipo de elementos, irrompe de forma abrupta sobre os taludes incorporados nestes, sendo por isso o tipo de rebentação mais condicionante para a estabilidade do manto resistente desta categoria de estruturas de proteção (Taveira et al., 2003).

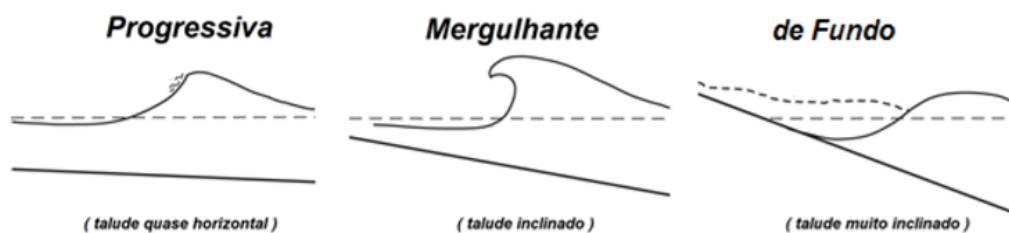


Figura 6 – Classes de rebentação (Costa, 2017).

Sendo assim, para efeitos de implantação de estruturas de quebra-mar ou de renovação destas, é importante ter uma plena perceção em fase de projeto se a área onde vai ser executada a obra se localiza ou não numa zona de rebentação de ondas e se estas são maioritariamente limitadas pelo decréscimo da sua profundidade com o fundo aquático.

Quando um quebra-mar de taludes está implantado numa zona de rebentação as ondas rebentam antes de atingir o talude, sendo que, quando isso não acontece, as ondas rebentam de forma súbita sobre os taludes deste tipo de elementos. Esta última situação é considerada a mais desfavorável e a conjugação que deve ser alvo de uma apreciação mais rigorosa no estudo deste tipo de obras (CERC, 1984).

3.1.2.3. Efeito das tempestades e da maré astronómica

Outros fenómenos interligados à agitação marítima, num efeito complementar àqueles que foram mencionados supra, são os eventos interligados ao efeito das tempestades e ao efeito da maré astronómica.

As tempestades são fenómenos que, na maioria dos casos, têm origem numa faixa da superfície terrestre muito próxima da linha do equador, limitada a norte e a sul por duas linhas imaginárias que circundam o globo terrestre designadas por trópicos. Estes eventos críticos deslocam-se tipicamente para norte do planeta após se desenvolverem, e assolam particularmente o Oceano Atlântico, nomeadamente áreas como as do Golfo do México, a costa Este americana e outras zonas como os Açores, Madeira ou mesmo a Península Ibérica (Costa, 2017).

A conjugação do pico de uma tempestade com uma preia-mar de águas vivas pode ocasionar solicitações particularmente severas para uma estrutura de proteção costeira devido ao gradiente de pressão existente no epicentro da tempestade ser bastante inferior ao existente na periferia da tempestade (similar à pressão atmosférica). Esse contexto acarreta convencionalmente uma subida bastante expressiva do nível do mar na zona onde se encontra o epicentro da tempestade (Sorensen, 1997).

Por fim, o efeito da maré astronómica é um evento que decorre de forma prevalente da interação gravitacional entre a Terra, a Lua e o Sol, e que conduz à ocorrência de oscilações cíclicas do nível do mar. A Lua é a principal responsável pelo desenvolvimento destes fenómenos pois, apesar de a

sua massa ser muito inferior à do Sol, o quadrado da distância da Terra ao Sol é extraordinariamente maior do que o mesmo valor quando se considera a distância da Terra à Lua, motivando a eclosão de transmutações nas marés oceânicas.

As marés, em razão do seu período, podem ser tipo diurno, semidiurno ou misto, podendo ter amplitudes muito inconstantes ao longo do ano em função da geomorfologia da linha de costa e da batimetria em cada zona. Por isso, para efeitos de projeto de estruturas costeiras, deve ser tido em conta o nível máximo de preia-mar, acrescido de uma sobrelevação do nível do mar que traduza o efeito de uma tempestade, já que uma maré alta pode ocasionar, mediante certos fatores, a ocorrência de tempestades particularmente rigorosas que poderão condicionar com grande magnitude a operacionalidade de elementos de proteção (Sorensen, 1997).

As marés astronómicas em Portugal Continental são semidiurnas com ciclos de 28 dias e facilmente controláveis pela Lua (Lopes, 2018).

A Figura 7 ilustra a influência do Sol e da Lua sobre as marés.

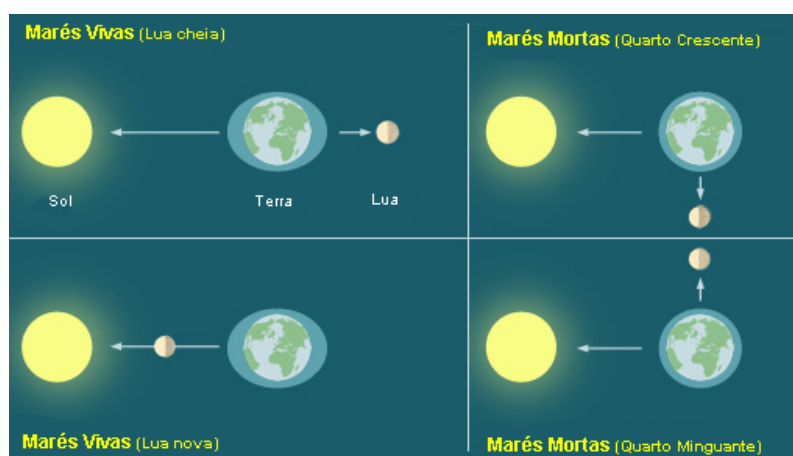


Figura 7 – Ilustração esquematizada das modificações anuais da maré astronómica e do influxo da Lua e do Sol nestas (Fonte: www.poseidon.pt/meteorologia/as-mares/, consultado em setembro de 2019).

3.1.3. Análise da Agitação

Quando se pretende proceder à requalificação de uma estrutura de quebra-mar é fundamental predispor de meios suficientes e qualificados para assegurar uma previsão fidedigna da agitação marítima ocorrente na zona da obra. Existem dois tipos de análises muito empregues neste tipo de estudos, que são: a análise onda-a-onda e a análise espectral.

A análise onda-a-onda traduz-se num levantamento dos registos da superfície livre do mar em certas zonas, sendo avaliada a altura e o período de cada onda nessas áreas em particular, e obrigatório que a crista e a cava de cada onda sejam devidamente definidas.

A análise espectral traduz-se num estudo com o objetivo de caracterizar a distribuição da energia das ondas e definir os valores estatísticos médios para cada frequência (a que se dá o nome de

espectro de onda), sendo no fundo uma conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência, proposta por Cooley e Turkey em 1965 (USACE, 2015).

3.1.4. Onda de Projeto

As estruturas de proteção costeira, nomeadamente os quebra-mares, são sempre projetadas com a finalidade das mesmas conseguirem resistir de forma adequada à ação direta de um temporal, durante a sua vida útil, que possa atingir a área onde estão situados (períodos de retorno entre $T=25$ anos e $T=100$ anos, dependendo da importância da estrutura).

No caso da obra de requalificação do quebra-mar de taludes no Porto de Leixões, a nova estrutura prolongada deve ser projetada para a altura significativa pois pode vir a expor danos que ocasionem a sua ruína.

Este estudo estatístico é denominado por “onda de projeto” e é com base nesse critério que se dimensionam todas as secções de uma estrutura costeira. Estipular uma altura de onda de projeto é um processo acurado, fruto do nível de dano que deve ser considerado aceitável por uma determinada obra de proteção costeira. Além disso, deve ser tido em conta a existência de um equilíbrio entre a economia e a segurança que se pretende alcançar durante a vida útil da estrutura, bem como se deve enquadrar toda a experiência adquirida em obras anteriores da mesma categoria na otimização da futura obra.

Apesar de não ser possível deduzir com precisão a altura de onda que irá atingir a estrutura nos anos que se seguirão à implementação da mesma, é fundamental que não exista uma dubiedade excessiva quanto à altura desta, pois essa conjugação pode favorecer em cerca de 20%, a probabilidade de colapso de um quebra-mar (Burcharth, 2000). Contudo, com uma abordagem estatística conveniente dos registos de agitação conhecidos é possível aferir uma altura de onda que garanta a segurança e a funcionalidade da estrutura.

Por fim, é importante compreender que no caso de uma estrutura de quebra-mar esta será invariavelmente “agredida” por ondas com alturas superiores às de projeto. Por isso, qualquer projeto de uma estrutura deste género tem sempre um risco associado conhecido, já que é financeiramente desapropriado dimensionar uma estrutura de quebra-mar para resistir a qualquer temporal que possa vir a transcorrer.

3.2. Tipos de Quebra-mares

Um quebra-mar é um elemento marítimo de engenharia costeira que se constitui por ser um obstáculo à propagação natural de ondas formadas pelo vento sobre a superfície da água. Consegue criar satisfatórias condições de segurança em infraestruturas portuárias ou em áreas de edificação, resultantes do efeito deste elemento na conseguinte redução da agitação marítima. Podem ser classificados como quebra-mares enraizados ou destacados, respetivamente em função do objetivo

de implementação dos mesmos, que pode ser unicamente de proteção costeira ou de proteção e abrigo quando inseridos numa estrutura portuária (Vera-Cruz, 1969).

Na realidade, sempre que houve a indispensabilidade de proteger qualquer área localizada numa linha de costa houve também a necessidade de se recorrer, por inúmeras vezes, a soluções de índole natural como materiais de enrocamento ou outro tipo de solução artificial (muitas das vezes devido à insuficiência de pedreiras para extração de blocos naturais nas imediações da área onde seria necessário implementar o elemento de proteção). Além do mais, com a evolução marítima atual é sempre propositada a hipótese de expansão de uma infraestrutura portuária em termos de espaço de jurisdição.

No entanto, tendo também em conta as consequências das alterações climáticas cada vez mais notórias nos dias de hoje, nomeadamente ao nível dos efeitos e dos fenómenos adversos bem presentes nos oceanos, é fundamental que a qualquer infraestrutura marítima sejam agregadas áreas com condições de navegabilidade apropriadas para que os diversos processos inerentes a um modelo de exploração portuário se realizem com segurança e com efetividade. Para tal recorre-se essencialmente à implementação de soluções como são o caso de elementos de quebra-mares, já que este tipo de estruturas estão preparadas para assegurar as devidas condições de abrigo em relação aos possíveis efeitos menos favoráveis associados à agitação marítima. Além disso, este tipo de estruturas também pode adquirir a função de cais de acostagem na sua componente interior de abrigo e de amarração a navios (Taveira, 2017).

Sendo assim, os quebra-mares têm normalmente duas funções em paralelo, a de funcionamento como cais de acostagem e a de abrigo, sendo que a solução de dimensionamento a implantar é também fortemente condicionada não só pela finalidade que se requer, mas também por uma solução que inviabilize galgamentos marítimos, entre outro tipo de exigências. Além disso, a sua execução é também condicionada pela constituição e implementação da base que se requer para a estrutura, como também pelo clima de agitação local, pela altura de onda de projeto, pelo custo económico da obra, por diversas disposições de mitigação a serem tomadas pelos efeitos que a obra terá na região onde será implantada, pelos impactes ambientais e por outros fatores secundários. As direções tomadas pela agitação marítima terão, da mesma forma, uma grande influência na orientação, no número, na forma e na configuração de qualquer quebra-mar que venha a ser executado numa bacia portuária (Castro, 2018).

Quando se procede à construção de uma estrutura de tipo quebra-mar deve-se ter muita atenção às condicionantes locais, sendo as mais relevantes o tipo de ambiente, o tipo de fundação e o grau de abrigo, como se pode observar no Quadro 1. A necessidade de realização de uma análise criteriosa destes fatores deve-se ao facto de uma das maiores pretensões na execução deste tipo de estruturas ser a obtenção de um rácio positivo entre custo/benefício para a empreitada em

causa, ou seja obter um preço final para a obra atrativo tendo em conta o grau de segurança satisfatório que a mesma deve oferecer (Castro, 2018).

Quadro 1 – Principais condicionantes a ter em conta no processo de análise para a execução de uma estrutura de quebra-mar convencional (adaptado de Castro, 2018).

Condições	Propriedades	Características
Ambiente	Água	Doce
		Salgada
	Maré	Preia-mar
		Baixa-mar
	Profundidade (p)	$p < 9$ m
		$9 \text{ m} \leq p < 12$ m
		$12 \text{ m} \leq p < 15$ m
$15 \text{ m} \leq p < 20$ m		
$p \geq 20$ m		
Fundação	Solo	Rochoso
		Arenoso
Nível de abrigo	Deve dar uma resposta competente a todas as possíveis solicitações ocorrentes. Não é imperativo que a energia de onda seja totalmente dissipada pela estrutura de contenção.	

Por isso, após a seleção da tipologia de quebra-mar pretendida, deve-se ter em conta todos os aspetos interligados com o seu dimensionamento hidráulico e estrutural que concebem a sua implementação. Outros aspetos incluem aqueles que estão interligados com a dimensão do elemento (em termos de extensão ou com a definição da cota de coroamento do elemento em fase de dimensionamento preliminar) e a caracterização da agitação marítima do projeto.

Posteriormente, deve-se proceder à definição e elaboração da geometria do perfil da estrutura e definir o tipo de bloco a utilizar, bem como o peso dos mesmos, para o segundo dimensionamento estrutural. A não funcionalidade de um quebra-mar está normalmente associada com a danificação do manto resistente. No entanto, isto não inviabiliza que outro tipo de problemas que possam advir não estejam relacionados com outro setor constituinte do elemento estrutural.

O dimensionamento estrutural deste tipo de elementos é delineado com base em fórmulas deduzidas a partir de considerações teóricas simplificadas baseadas em resultados de ensaios em modelo reduzido, ou seja num sentido de abordagem semi-empírico (Castro, 2018).

A fórmula mais aceite atualmente, por ser a mais aplicada por projetistas no pré-dimensionamento deste tipo de estruturas, é a de Hudson/W.E.S. Esta fórmula é deduzida com base em ensaios com ondas regulares, sendo que no pré-dimensionamento do quebra-mar exterior de Leixões, a mesma foi também empregue. No entanto, é obrigatório e fundamental recorrer a outros recursos para concluir o dimensionamento deste tipo de estruturas, pois a utilização da fórmula de Hudson/W.E.S. é restrita somente para efeitos de pré-dimensionamento.

Além disso, outro fator essencial a ter em conta na implementação deste tipo de obras, nomeadamente no seu dimensionamento e na definição da solução final, é o conhecimento

abrangente que se deve possuir com base no empirismo, pela implementação de outras obras do mesmo género e perante condições igualmente semelhantes.

Quanto à implementação da obra de proteção em si, a mesma pode ser executada por terra, por mar ou por ambas, sendo que todas as opções terão benefícios e inconvenientes, essencialmente no preço final da empreitada. Os principais inconvenientes estão também muitas vezes interligados à definição inequívoca das cotas de projeto debaixo de água, particularmente em fase de projeto, de modo a evitar eventuais deficiências na construção do manto levada a cabo por mergulhadores (Castro, 2018).

A cabeça e os mantos resistentes precisam de ser especialmente protegidos nos períodos de inverno porque são consideradas zonas sensíveis e fundamentais de um quebra-mar.

3.2.1. Introdução

Como foi referido anteriormente, a princípio da utilização desta tecnologia de proteção costeira, eram utilizados enrocamentos de maneira a criar um molhe de blocos cujas laterais tinham as inclinações de um talude natural formado por um conjunto de enrocamentos dispostos pela sua área. No entanto, com o passar do tempo, a criação de quebra-mares foi substancialmente melhorada à medida que os métodos foram evoluindo face à conveniência da sua implementação em zonas mais propensas à exposição da agitação marítima e com maiores profundidades.

Entre as muitas opções de quebra-mares existentes, os modelos de tipologia tradicional mais conhecidos são os de taludes, os de parede vertical, os quebra-mares mistos, os quebra-mares de estrutura mista e os quebra-mares submersos.

A função principal destes cinco tipos de modelos de quebra-mares convencionais é que estes consigam evitar galgamentos de água para as zonas em que os próprios têm a função de abrigar de maneira eficiente, sendo por isso muito importante definir a cota de coroamento recomendada no estudo e execução do projeto (Lopes, 2005).

Existem também outro tipo de tipologias de quebra-mares menos convencionais, como quebra-mares flutuantes ou de ar comprimido, que também podem ser implementados em certos cenários, nomeadamente por razões logísticas e económicas, ou mesmo por razões de índole mais técnica. A sua implantação só é recomendada em enquadramentos de características marítimas suaves e favoráveis (Pita, 1985).

Quando se procede à implementação de uma estrutura de quebra-mar numa área precisa, aquilo que se pretende é que a solução que foi idealizada, quer seja implementada por blocos de origem natural ou artificial, seja a mais segura e estável possível de modo a responder de forma eficiente à ação das ondas marítimas e de maneira a dissipar a maior parte da energia das mesmas (Ferreira, 2009).

Relativamente aos quebra-mares do tipo não convencional, como alguns tipos de quebra-mares submersos muito específicos, outros modelos de proteção flutuantes e de ar comprimido, já não se exige uma solução de implementação tão exigente como para os modelos de tipologias convencionais de quebra-mares, pois este tipo de estruturas só deve ser implementada em determinado tipo de condições, sobretudo favoráveis, por razões de índole económica ou mesmo técnica.

3.2.1.1. Quebra-mar de Taludes

Um quebra-mar de taludes, esquematizado na Figura 8, é uma estrutura de secção trapezoidal que é constituída convencionalmente por um conjunto de blocos de rocha (enrocamentos) ou por blocos de betão com configurações específicas. Os blocos são preparados para condições intensas de desgaste, são de fácil implementação e têm grande capacidade para a dissipação de ondas, possibilitando a sua rebentação nos taludes. Em suma, os quebra-mares de tipologia em taludes têm a função de dissipar a energia das ondas por rebentação das mesmas na sua estrutura, por atrito ou pela formação de uma emulsão ar-água, sendo a energia de onda remanescente refletida para o largo (Pita, 1985).

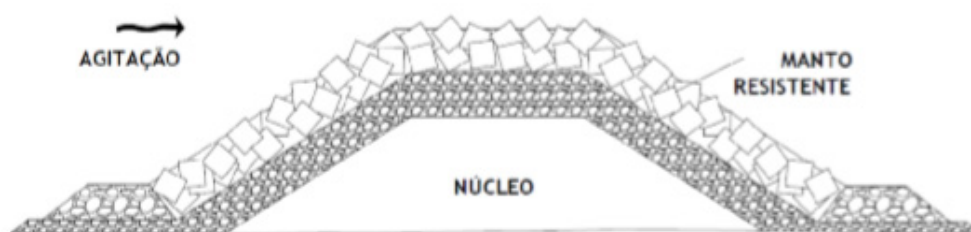


Figura 8 – Ilustração de um quebra-mar em taludes convencional (Taveira, 2001).

Na Figura 9 encontra-se ilustrada uma esquematização da secção transversal de um quebra-mar de taludes com muro-cortina e defletor.

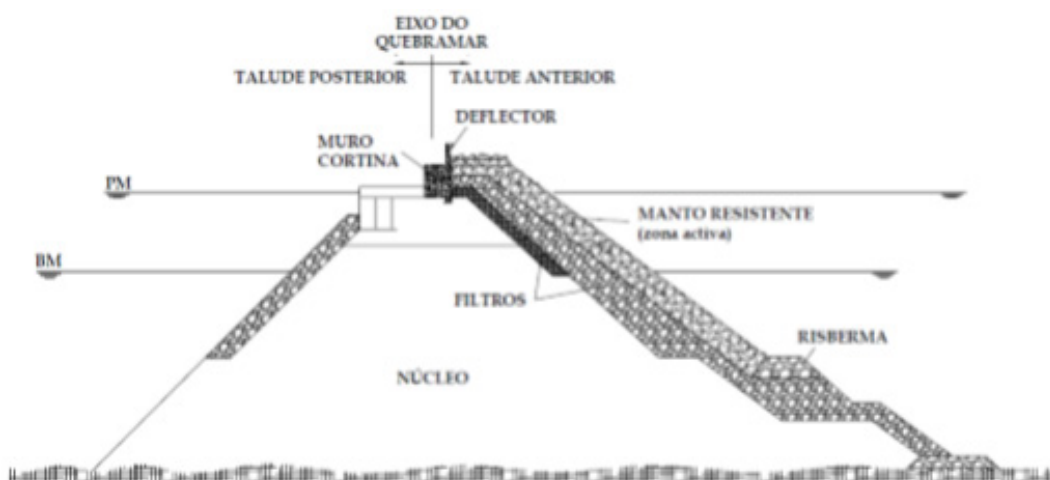


Figura 9 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar em taludes (Taveira, 2010).

3.2.1.2. Quebra-mar de Paredes Verticais

Um quebra-mar de paredes verticais, esquematizado na Figura 10, é uma estrutura de proteção constituída por uma parede impermeável em que a sua base é fundamentalmente constituída por um aglomerado de blocos de enrocamento. Sobre estes estão dispostos blocos de betão ou caixões que possibilitam o fenómeno de reflexão das ondas quando estas incidem no elemento sem que as mesmas venham a despontar (fenómeno de rebentação). É conveniente que uma estrutura com estas características se situe em áreas aquáticas com grandes profundidades.

A principal inconveniência deste tipo de estruturas passa pela ruína súbita das mesmas quando estas atingem o ponto de rotura por já não terem condições de resistência para com os fenómenos meteo-marítimos ocorrentes (Pita, 1985).

Na Figura 11 está esquematizada a secção transversal de um quebra-mar vertical convencional.

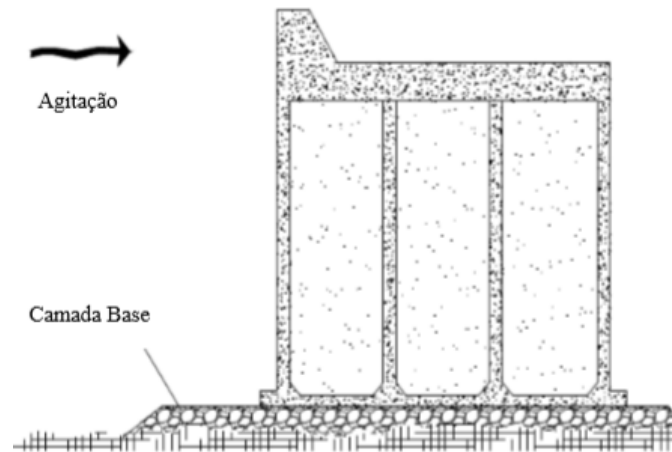


Figura 10 – Ilustração de um quebra-mar vertical convencional (Taveira, 2010).

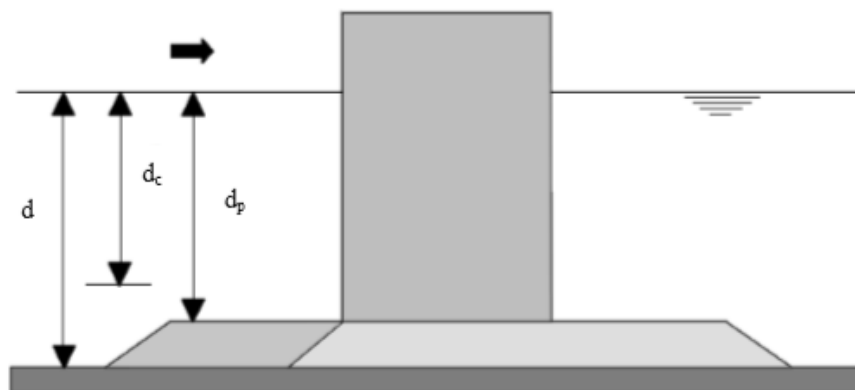


Figura 11 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar vertical convencional (Taveira, 2010).

Pode-se observar na Figura 11 que a altura de onda incidente d_c é inferior à altura entre a superfície livre da água e a fundação do quebra-mar vertical, d_p (Taveira, 2010).

3.2.1.3. Quebra-mar Misto

Um quebra-mar misto, esquematizado na Figura 12, é uma junção dos dois tipos de quebra-mares descritos anteriormente, ou seja, é um tipo de estrutura costeira composto por um prisma de

enrocamento que se desenvolve desde a base do quebra-mar até uma certa cota, sobre a qual assenta uma estrutura vertical constituída por caixões ou blocos de betão habitualmente. Até uma determinada altura de água a estrutura comporta-se como um quebra-mar de taludes, e para alturas superiores comporta-se como uma combinação entre um quebra-mar de parede vertical e um quebra-mar de taludes.

Um caso muito específico desta tipologia de quebra-mar é o modelo de quebra-mar de estrutura mista constituído por uma parede vertical. Este consiste essencialmente num muro-cortina que serve para aperfeiçoar a resposta da estrutura aos galgamentos de ondas e que retrata muito bem uma solução desta tipologia (Pita, 1985).

Na Figura 13 pode-se observar a secção transversal de um quebra-mar misto convencional.

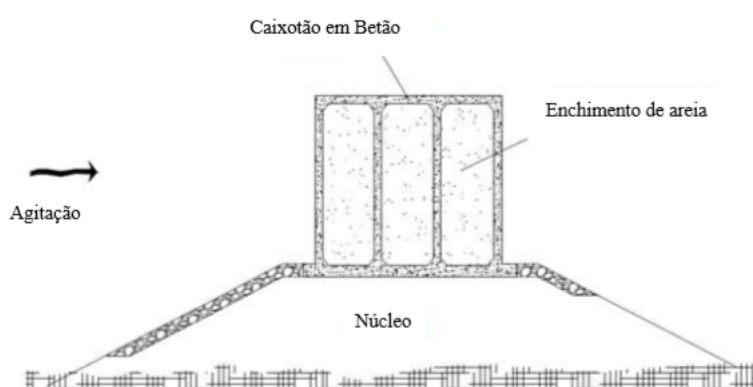


Figura 12 – Ilustração de um quebra-mar misto convencional (Taveira, 2001).

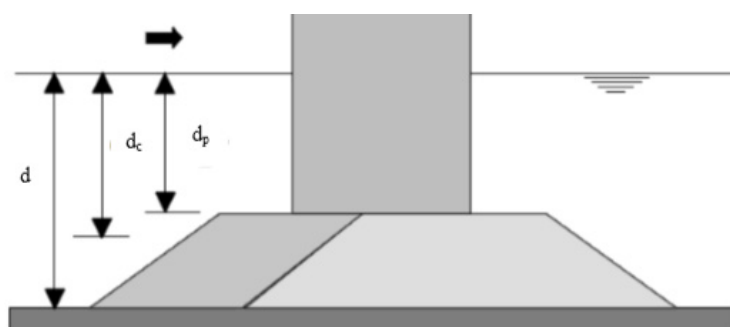


Figura 13 – Ilustração da secção transversal de um quebra-mar misto convencional (Taveira, 2010).

Na Figura 13 pode-se observar que a altura de onda incidente d_c é superior à altura entre a superfície livre da água e a fundação do quebra-mar vertical, d_p (Taveira, 2010).

3.2.1.4. Quebra-mar de Estrutura Mista

Um quebra-mar de estrutura mista, esquematizado na Figura 14, é um elemento de proteção muito similar a um quebra-mar misto. Distingue-se deste pelo facto conter apenas um muro-cortina na secção superior do mesmo, em vez de ser implementado por caixotões em betão e areia ou por blocos em betão como numa estrutura de proteção mista convencional.

A função deste elemento diferenciado é a maximização do comportamento da estrutura em termos de proteção quanto aos fenómenos de galgamento de ondas durante a sua vida útil (Pita, 1985). Os quebra-mares de estrutura mista têm um comportamento funcional muito similar aos quebra-mares em taludes.

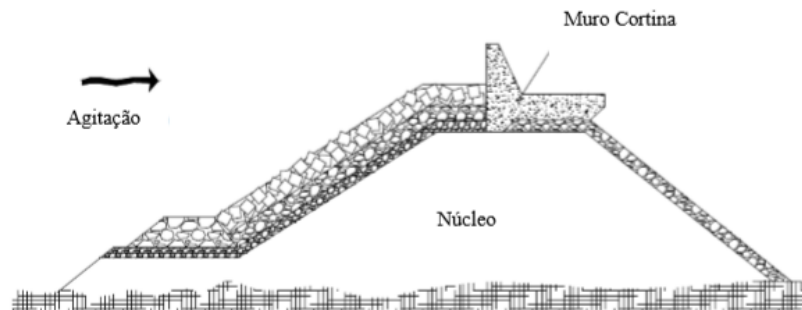


Figura 14 – Ilustração de um quebra-mar de estrutura mista convencional (Taveira, 2001).

3.2.1.5. Quebra-mar Submerso

Um quebra-mar submerso, esquematizado na Figura 15, é uma estrutura de geometria similar a um quebra-mar de taludes mas com uma função muito mais específica que este, provocando somente a rebentação das ondas mais elevadas. Este pressuposto perfaz, no entanto, que este tipo de elemento não consiga absorver a totalidade da energia de onda resultante do fenómeno de rebentação, sendo por isso mesmo uma estrutura costeira de dimensionamento muito mais linear que todas as outras anteriores.

O rebentamento da onda é minorado através do elemento de coroamento da estrutura de proteção situado a uma cota equivalente à cota mínima previsível em baixa-mar. Contudo, este tipo de estrutura não evita com que ondas com alturas mais elevadas possam atingir outras estruturas adjacentes ao quebra-mar submerso. Permitem, no entanto, que ondas de alturas inferiores sejam suavizadas em termos de energia de impacto.

O Porto de Leixões inclui uma estrutura deste género situada no extradorso do quebra-mar exterior que alberga esta mesma infraestrutura portuária. A secção transversal do quebra-mar submerso localizado no extradorso do quebra-mar exterior do Porto de Leixões encontra-se representada pelo Anexo I.

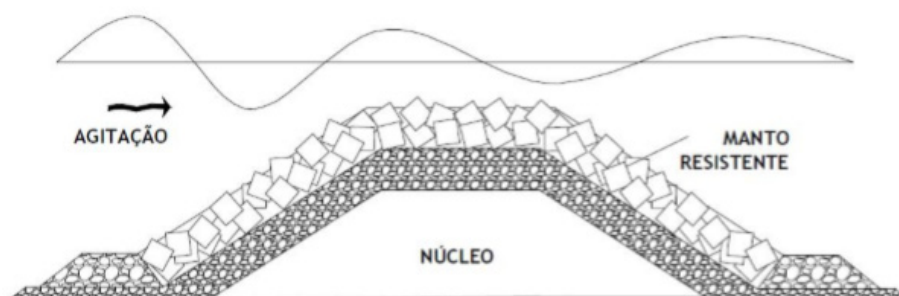


Figura 15 – Ilustração de um quebra-mar submerso convencional (Taveira, 2001).

De seguida, representados na Figura 16, estão todos os tipos de quebra-mares descritos acima colocados lado a lado.

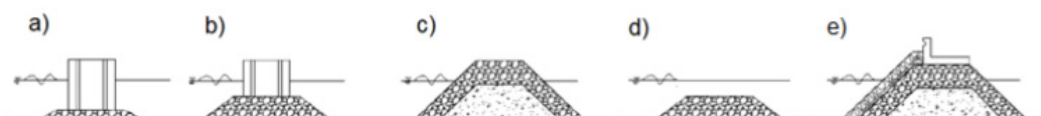


Figura 16 – Tipos de quebra-mares: a) quebra-mar de parede vertical; b) quebra-mar misto; c) quebra-mar de taludes; d) quebra-mar submerso; e) quebra-mar de estrutura mista (com superestrutura e muro-cortina) (adaptado de Pita, 1986).

3.2.1.6. Quebra-mar Flutuante

O quebra-mar de tipologia flutuante, esquematizado na Figura 17, é uma estrutura muito específica e é utilizado em cenários muito característicos de gestão portuária, essencialmente em áreas com condições meteo-marítimas muito cómodas e suaves.

Os tipos de materiais utilizados neste tipo de estruturas são normalmente distintos daqueles que são empregues nas estruturas de proteção mais convencionais, e para diferentes tipos de cenários hídricos de outro nível de severidade. As opções para constituição deste tipo de estruturas podem recair em materiais como lâminas, pneus, esferas, madeira, entre outros (Pita, 1985).

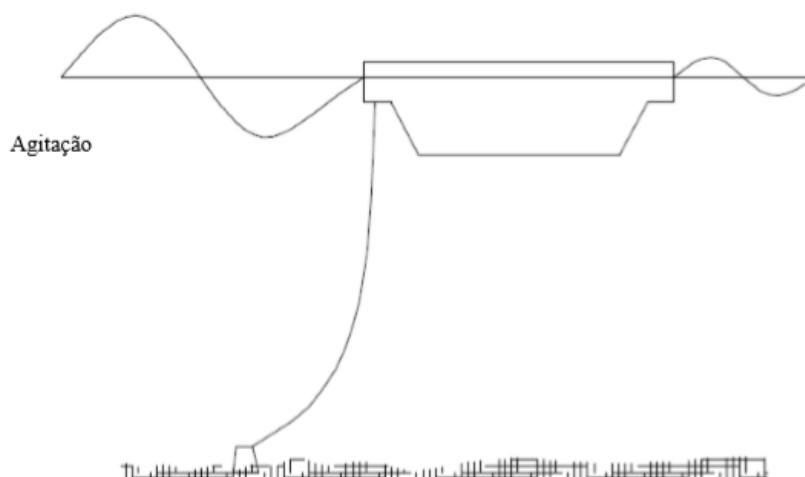


Figura 17 – Ilustração de um quebra-mar flutuante (Taveira, 2001).

3.2.2. Seleção da Tipologia de Quebra-mar

As estruturas de proteção convencionais podem ainda ser classificadas como galgáveis ou não galgáveis, sendo que esta avaliação está integralmente relacionada com o valor da cota de coroamento e o facto da mesma ser eficiente (ou não) no impedimento do galgamento da estrutura.

Por isso, a seleção por uma tipologia de quebra-mar em detrimento de outra é sempre um corolário de uma análise bastante exigente que abarca múltiplos aspetos que podem logo de princípio inviabilizar a sua escolha.

As tipologias de estruturas de quebra-mares mais elegidas normalmente recaem entre um quebra-mar vertical e um quebra-mar de taludes. Relativamente a esta última categoria, a mesma oferece outro tipo de resposta, principalmente num contexto em que as profundidades em questão não implicam um volume de materiais tão grande que tornem economicamente inexecutável esta solução, em oposição a uma solução com quebra-mar vertical (Pita, 1986).

Associados a esta conjugação estão também fatores como a área de localização onde se quer implementar a estrutura de proteção, assim como a batimetria do local. Estas condições influenciam também a profundidade a que vai ficar fundada a estrutura, sendo que para profundidades superiores a 15 m é recomendada a estrutura de parede vertical. Economicamente, a mesma é mais executável tendo em conta o volume de material que seria necessário para a implementação de um quebra-mar de taludes, devido à forma trapezoidal da sua secção transversal nessas condições. De igual forma, mas para profundidades inferiores a 15 m, a escolha de um quebra-mar de taludes é a opção mais viável (CIRIA et al., 2007).

Os quebra-mares de taludes apresentam também uma reduzida suscetibilidade a assentamentos diferenciais, com exceção das zonas de betão da superestrutura, e têm predisposição para desenvolverem processos de ruína progressivos a médio-longo prazo. Porém, a conciliação de danos permite, na maioria dos casos, a reparação da estrutura e a correção de alguns erros de construção e dimensionamento antes da ruína completa da mesma. Adicionalmente, apresentam uma grande capacidade para uma adequada dissipação de energia em resposta ao fenómeno de espraiamento das ondas nos taludes, promovendo a diminuição da reflexão da agitação (exigência ícone de qualquer quebra-mar de parede vertical convencional).

Assim sendo, a seleção e o custo de execução de um quebra-mar depende maioritariamente da profundidade a que o mesmo vai ser implantado, pois quanto maior for o valor da mesma, mais dispendioso será o custo de obra. O tipo de agitação marítima local também influenciará consideravelmente o preço final da estrutura. Na requalificação e prolongamento do quebra-mar exterior de Leixões, este último fator será um dos principais aspetos a ter em conta pois é de conhecimento geral a severidade da agitação marítima característica da costa portuguesa.

Sintetizando, é muito importante ter atenção a todas estas combinações de fatores em fase de projeto com vista a conseguir obter a melhor opção em termos de eficiência e de preço, não descurando a hipótese de guarnecer a estrutura principal de outras infraestruturas complementares. Por isso, é essencial ter em conta quais os materiais que devem ser empregues durante a implementação da obra, e quais as propriedades dos mesmos, sobretudo ao nível da sua impermeabilidade – quanto menos impermeáveis forem, menor será a reflexão marítima provocada pelo elemento estrutural. A geometria determinada para a estrutura de proteção, a disponibilidade de materiais para efetuar a obra e a acessibilidade destes ao trecho principal da

obra serão também fatores determinantes na decisão final para a execução da empreitada (Pita, 1986).

3.3. Quebra-mar de Taludes

Sendo que no Porto de Leixões o projeto de extensão do quebra-mar exterior incide sobre um quebra-mar de taludes, serão de seguida descritos o traçado, geometria, tipos de ruína e a fase de construção de uma estrutura convencional desta tipologia.

3.3.1. Traçado e Geometria

O traçado e a geometria de um quebra-mar são dois parâmetros de projeto influenciados pela localização onde será implantada a infraestrutura portuária e se a mesma é uma infraestrutura natural ou artificial. O traçado e a geometria de uma estrutura desta natureza estão igualmente condicionados pelo grau de proteção que o elemento carece dependendo da sua localização, entre outros fatores. No entanto, o grau de abrigo de uma estrutura deste tipo pode sempre ser otimizado através da conciliação de traçados com diferentes perfis transversais de quebra-mares, pelo menor custo de obra possível, devendo-se tirar partido de outros fatores se possível, como a agitação marítima, a batimetria ou o clima.

O traçado de um quebra-mar é delineado tendo em conta o tipo de obra para o qual o mesmo é projetado. Todavia, este parâmetro está dependente de outros, entre eles o transporte de sedimentos, o ambiente climático, a agitação marítima e também um fator fundamental, que é a evolução da globalização marítima atual refletida nas modificações dos elementos náuticos. (CIRIA et al., 2007).

Em razão deste último fator, primordial na evolução e internacionalização de qualquer infraestrutura portuária, deve ser dada especial atenção ao dimensionamento de qualquer estrutura de proteção, ou reconfiguração desta, nomeadamente a alguns setores da estrutura mais sensíveis e vulneráveis. Um desses setores mais delicados é o extremo da estrutura, localizado no plano de água, que constitui uma zona de grande vulnerabilidade em termos de influência na manobrabilidade naval e por ser um setor localizado na zona de entrada de um porto. Além desse, também o manto da estrutura perfaz outro trecho do elemento de proteção que carece de uma especial vigilância e monitorização. Em planta, um quebra-mar de taludes convencional é constituído por três setores distintos, todos eles sensíveis a fenómenos de concentração de energia erosiva, como se pode observar na Figura 18. Entre eles, o setor mais extremo e localizado no plano de água, designado por cabeça, é particularmente o mais sensível à ação de eventuais eventos oceânicos. Os outros dois setores adjacentes definem-se como zona central, designada por tronco, e zona de enraizamento, que retrata a união da estrutura à faixa de costa (CIRIA et al., 2007).

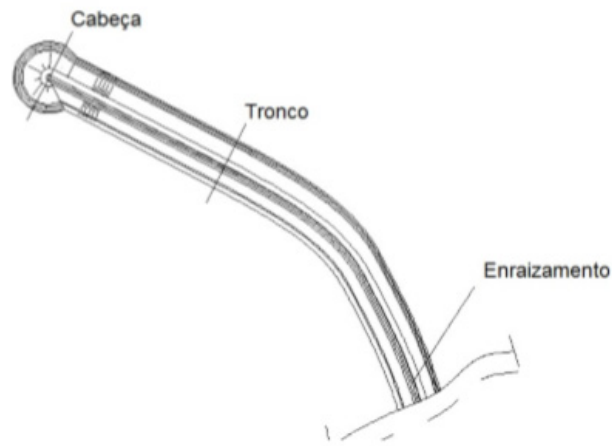


Figura 18 – Traçado em planta de um quebra-mar de taludes convencional dividido nos seus três setores principais (Costa, 2017).

Outro aspeto a ter em conta em fase de projeto relacionado com o traçado da estrutura é que este deve ser o mais otimizado possível, de modo a ser minorada a sua extensão se esse critério for vantajoso. Posteriormente deve-se também aferir a possibilidade de reduzir a profundidade de implantação do elemento, sendo que a posição deste deve também tirar partido da batimetria marítima de modo a minimizar a altura da onda incidente na estrutura. Deve também ser dada preferência à seleção de troços convexos, em vez de troços retilíneos ou côncavos, de modo a minorar igualmente a reflexão de ondas incidentes no quebra-mar associada ao conseqüente aumento da altura de onda nesses setores. Por fim, o enraizamento da estrutura deve ter origem numa zona costeira de natureza rochosa de modo a atenuar a erosão da fundação nesse local.

Na Figura 19 encontra-se representado um modelo de uma solução convencional para o traçado de um quebra-mar, em função da direção predominante.

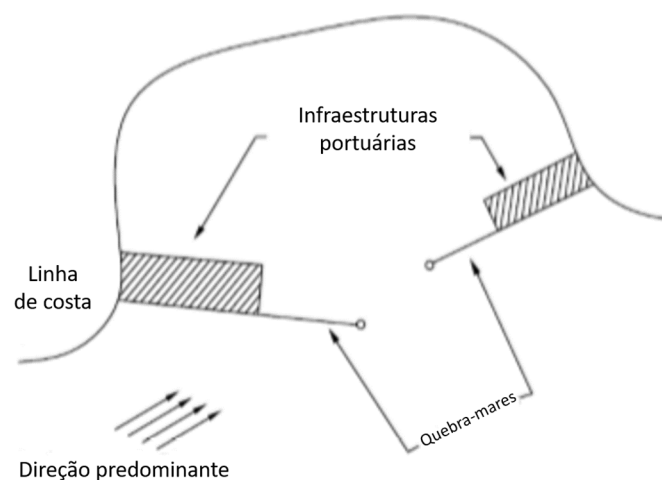


Figura 19 – Modelo de solução convencional para o traçado de um quebra-mar destinado a proteger uma infraestrutura portuária, em função da direção predominante da agitação marítima (adaptado de Costa, 2017).

Relativamente à geometria de um quebra-mar de taludes convencional, destacam-se 8 elementos diferenciados relativamente a sua secção transversal padrão (Pita, 1986):

- Núcleo: camada interna do quebra-mar, normalmente constituída por enrocamento de TOT;
- Risberma: camada abaixo do nível do mar que constitui uma plataforma que serve de apoio ao talude, também designada por pé do talude;
- Manto resistente: camada exterior de taludes, constituída ou por blocos naturais ou artificiais, que tem a função de proteção de todas as camadas mais interiores do perfil e que normalmente se prolonga apenas na extensão de toda a área inclinada, alvo da ação da agitação marítima ocorrente;
- Submanto: Área composta por uma ou mais camadas de enrocamento selecionado, de pesos iguais ou diferentes, destinada a evitar a saída de finos do núcleo e a aumentar a porosidade do talude anterior, também designado por filtro;
- Coroamento: linha estabelecida pelos pontos de cota máxima do quebra-mar;
- Superestrutura: estrutura de betão armado ou maciço, que serve como coroamento de um quebra-mar de estrutura mista e que tem a função de possibilitar o acesso ao quebra-mar e de minorar os galgamentos de ondas;
- Talude anterior: talude a barlar, inteiramente exposto à ação direta da agitação;
- Talude posterior: talude a sotamar, geralmente solicitado por força do galgamento da estrutura ou pela agitação residual que ocorra na área abrigada.

Estes elementos, integrantes de um quebra-mar de taludes, estão esquematizadas no Anexo II. No Quadro 2 apresentam-se as principais funções de componentes de um quebra-mar de taludes.

Quadro 2 – Principais funções de alguns elementos integrantes de um quebra-mar de taludes.

Componente	Função
Núcleo	Minorar a propagação de ondas
	Função de suporte para o manto e submanto
	Conferir estabilidade geotécnica
Berma/Pé de talude	Minorar as ações de ondas, espraimento e galgamentos
	Conferir estabilidade geotécnica adicional
Submanto	Proteger o núcleo e a fundação de todas as ações erosivas
	Atuar como filtro
	Minorar o gradiente hidráulico entre a fundação e o núcleo
	Regularizar e nivelar a superfície onde serão colocados os elementos de proteção
Manto Resistente	Minorar a erosão do submanto devido à agitação marítima
	Dissipação da energia das ondas
Coroamento	Minimizar os galgamentos de ondas
	Zona de acesso para trabalhos de manutenção
Superestrutura	Minimizar os galgamentos de ondas
	Plataforma de acesso, circulação e manutenção

Os parâmetros estruturais que permitem determinar geometricamente as características de um quebra-mar de taludes são os seguintes:

R_{ca} ou A_c – altura livre do topo do manto resistente, relativa ao nível de repouso;

R_c – altura livre do coroamento, relativa ao nível de repouso;

α – ângulo que o talude faz com a horizontal;

d – altura do coroamento da estrutura relativamente à base do talude;

d_{ca} – diferença de cotas entre o topo do muro-cortina e o topo do manto resistente;

B – largura do coroamento;

B_a – largura do manto resistente no coroamento;

B_c – largura da superestrutura;

t_a , t_u , t_f – espessura do manto, submanto e filtro;

h_t – profundidade da risberma em relação ao nível de repouso;

h – profundidade no pé da estrutura (CIRIA et al., 2007).

Estes parâmetros encontram-se esquematizados na Figura 20.

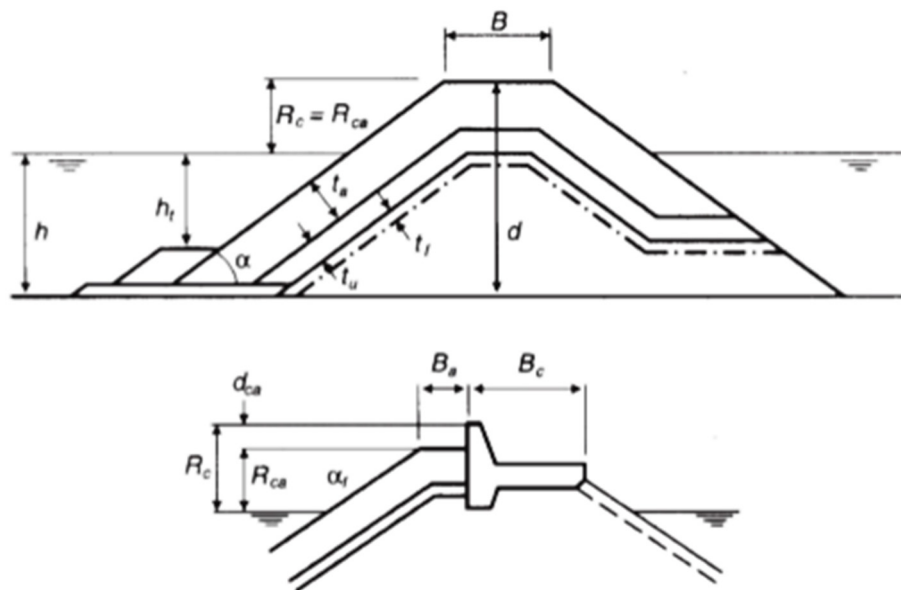


Figura 20 – Parâmetros estruturais de um quebra-mar de taludes convencional (CIRIA et al., 2007).

3.3.2. Dimensionamento

O projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões envolve um quebra-mar de taludes e, portanto, será de seguida demonstrado o processo de pré-dimensionamento de uma estrutura convencional deste tipo.

O principal objetivo do pré-dimensionamento de um quebra-mar de taludes consiste no cálculo do peso dos blocos que constituirão o manto resistente para o mesmo ser capaz de responder as exigências marítimas de maneira satisfatória quando solicitado. Existem, para o efeito, várias formulações semi-empíricas, tendo já sido referida anteriormente a mais aceite e utilizada nos dias

de hoje para efeitos de pré-dimensionamento de quebra-mares, que são as fórmulas baseadas nos trabalhos de Hudson (1959). No entanto, existem outras formulações igualmente importantes baseadas no estudo e interpretação de resultados obtidos em ensaios experimentais de modelos reduzidos de estruturas de proteção, como as baseadas nos trabalhos de Iribarren (1938), van der Meer (1988 e 1991), De Jong (1996), Burcharth et al. (1992) e, mais recentemente, Van Gent et al. (2004). Apesar de todas elas apresentarem limitações, estas equações permitem por outro lado minorar algumas das deficiências que o pré-dimensionamento deste tipo de estruturas ilustram posteriormente na prática, em termos da funcionalidade das mesmas e da resposta destas a fenómenos adversos durante a sua vida útil (adaptado de USACE, 2015a).

Com a evolução da atividade marítima mundial, e o conseqüente aumento do volume das embarcações inerentes à segurança que se exige para com este tipo de elementos, tem-se recorrido cada vez mais à utilização de blocos artificiais de betão, em preferência dos blocos de enrocamento tradicionais, para a constituição dos mantos resistentes em estruturas de proteção. Este facto deve-se essencialmente pela dificuldade em assegurar esse tipo de material em quantidade suficiente para as necessidades do dimensionamento da obra em causa, bem como muitas vezes pelo facto do local de origem para extração deste tipo de elemento construtivo se localizar numa área afastada da zona onde vai ser implementada a obra.

Por outro lado, os blocos artificiais de betão são mais regulares, e têm um maior peso por unidade, permitindo a construção de obras de proteção mais estáveis e equilibradas sendo a técnica de colocação dos mesmos um dos fatores que mais afeta a estabilidade do manto resistente (Hudson et al., 1979).

Na seguinte Figura 21 pode-se observar um organograma que incorpora todas as fases de um projeto de execução de um quebra-mar de taludes.

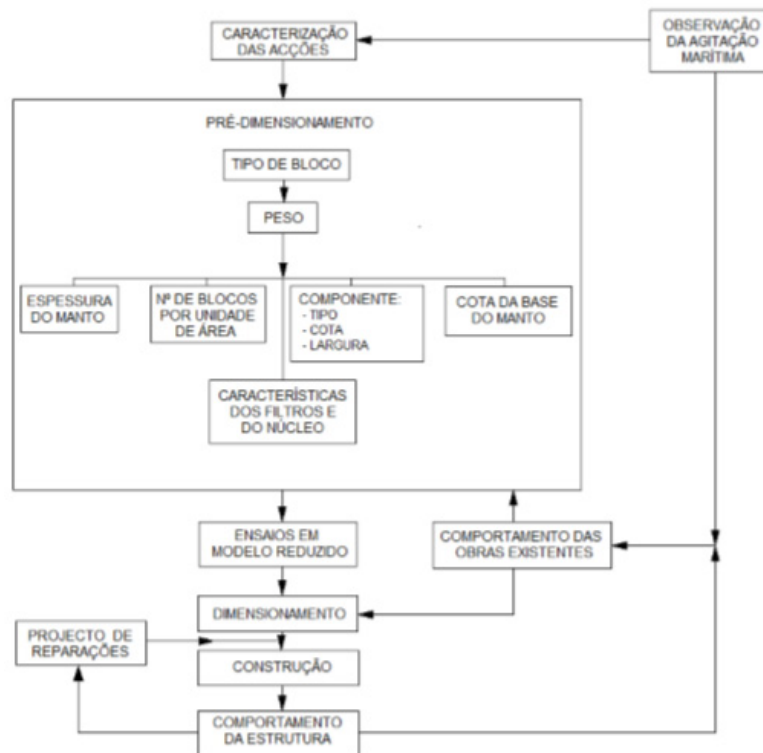


Figura 21 – Organograma que contempla todas as fases de um projeto de execução e operacionalidade de um quebra-mar de taludes (Pita, 1985).

Existem atualmente várias tipologias de blocos artificiais de betão que podem ser utilizados na configuração de um manto resistente numa estrutura de proteção, como se pode observar no Quadro 3. Dentro das várias opções disponíveis destacam-se o bloco tetrápode (1950), o dolo (1963) e o cubo Antifer (1969). A partir de 1980 destacam-se igualmente a criação de outras opções evolutivas de blocos como o *Accropode™*, o *Core-Loc™*, o *XBloc®* e mais recentemente o *Accropode™ II*, sendo este último uma opção de elemento construtivo bastante interessante pela sua excelente capacidade de imbricamento, de dissipação de energia das ondas e de resistência estrutural à agitação marítima.

No Quadro 4 são apresentadas as principais tipologias de blocos em betão segundo o seu padrão de colocação, número de camadas do manto resistente para os quais os mesmos estão apropriados, geometria e fatores que lhes conferem estabilidade.

Quadro 3 – Tipologia dos principais tipos de blocos artificiais de betão existentes com a indicação da data de criação dos mesmos e da origem destes (Bakker et al., 2003).

Nome	Ano	País	Nome	Ano	País
Cubo	-	-	Seabee	1978	Austrália
Paralelepípedo	-	-	Accropode®	1979	França
Tetrápodo	1950	França	Shed	1981	Reino Unido
Cubo Modificado	1959	EUA	Haro	1984	Bélgica
Stabit	1961	Japão	Core-Loc®	1995	Reino Unido
Akmon	1962	Reino Unido	A-Jack®	1998	EUA
Dolos	1963	Holanda	Xbloc	2003	Holanda
Hollow Square	1965	África do Sul	Accropode II®	2004	França
Cob	1969	Reino Unido	Cubipod	2005	Espanha
Cubo Antifer	1969	França	Core-Loc II®	2006	Reino Unido

Quadro 4 – Esquematização das principais tipologias de blocos em betão, segundo o seu padrão de colocação (regular ou irregular), o número de camadas do manto resistente para os quais os mesmos são apropriados, a sua geometria e os fatores que lhes conferem a estabilidade (adaptado de CIRIA et al., 2007).

Padrão de colocação	Nº de camadas	Geometria	Factor de estabilidade					
			Peso próprio		Imbricamento	Fricção		
Irregular	Dupla camada	Simples	Cubo	Cubo modificado	Antifer	Haro®		
		Complexa	Tetrápodo		Akmon			
					Dolos	Stabit		
	Camada simples	Simples	Cubo	A-Jack®				
		Complexa	Cubipod	Accropode™	Core-Loc™	Xbloc®	Accropode™II	
Regular	Camada simples	Simples	Cubo			Seabee		
		Complexa	Cubipod			Shed	Cob	

3.3.3. Estabilidade do Manto Resistente

A estabilidade do manto resistente, numa qualquer estrutura de proteção convencional, é essencialmente garantido pelo peso dos blocos que constituem esse setor e que, para efeitos de cálculo, é definido pela sigla F_G – força gravítica.

No entanto, as estruturas costeiras, nomeadamente as estruturas de proteção como os quebra-mares, são dimensionadas para suportar um nível de dano considerado tolerável que se traduz em termos de um número admissível de blocos integrados no manto que são deslocados da sua posição inicial, em termos da profundidade crítica de infraescavação ou em termos do volume máximo de sedimentos transportados (USACE, 2015a).

Se o nível de dano aceitável for ultrapassado a estrutura de proteção torna-se instável e não funcional. Os parâmetros que configuram as forças estabilizantes de uma estrutura deste tipo são

a coesão dos materiais e a força gravítica dos materiais. Os parâmetros que configuram forças instabilizantes são essencialmente os fenómenos de agitação marítima, nomeadamente as correntes, a agitação das ondas e as marés.

Para efeitos de cálculo, as siglas que caracterizam este tipo de forças instabilizantes são definidas por F_D – força de arrastamento, que simboliza as forças de arrastamento dos materiais, e F_L – força de levantamento, que simboliza as forças que induzem a ações de levantamento dos materiais (Costa, 2017).

Estas forças estão esquematizadas na Figura 22.

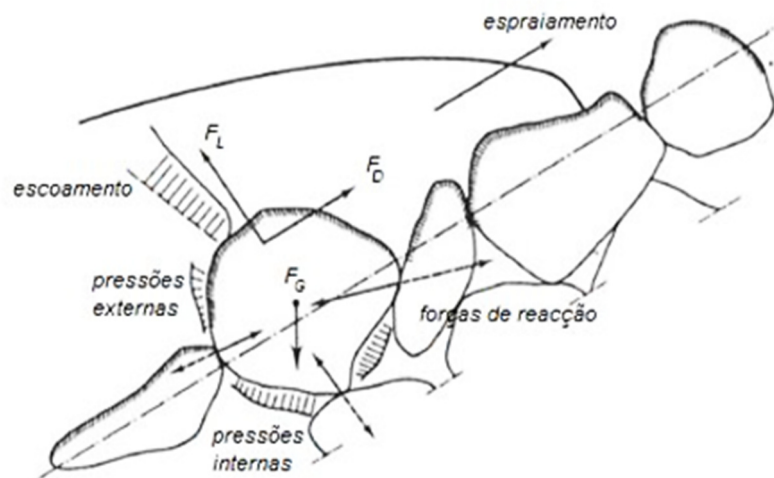


Figura 22 – Esquemática do comportamento da força estabilizante F_G e das forças instabilizantes F_D e F_L , em interação com os blocos que configuram a secção do manto resistente de uma estrutura de proteção (adaptado de CERC, 1984).

A estabilidade do manto resistente é definida em função da razão de harmonia entre as forças instabilizantes e as forças estabilizantes que atuam sobre este, expressada pela seguinte equação analítica,

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w v^2}{g(\rho_m - \rho_w)D} \quad [1]$$

na qual ρ_m e ρ_w representam as massas volúmicas do material que constitui o manto e da água, respetivamente; v representa a velocidade do escoamento; g representa a aceleração gravítica; e D representa o diâmetro nominal dos blocos.

Como a onda se propaga a uma profundidade reduzida no interior do talude e esta é diretamente proporcional à celeridade da onda, pode-se substituir a equação 1 na equação 2 abaixo, obtendo-se:

$$v = c = \sqrt{gH} \quad [2]$$

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w H}{(\rho_m - \rho_w) D} \quad [3]$$

$$\Delta = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w} = \frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \quad [4]$$

Por isso, conhecendo a massa volúmica Δ , é possível obter o número de estabilidade que é definido pela razão entre a ação instabilizadora da onda (estabelecida pela sua altura) e a ação estabilizadora do bloco (obtida pelo seu volume, D_n), expressada pela seguinte equação analítica,

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad [5]$$

onde N_s representa o número de estabilidade, H_s representa a altura de onda ($H_s = H_{1/3}$ ou $H_s = H m_0 = \sqrt{4m_0}$), Δ representa a massa volúmica relativa, e D_n representa o diâmetro nominal dos blocos. Quanto mais elevado for o valor de N_s , mais fiável será o comportamento funcional do manto resistente.

Em 1988, van der Meer acabaria por sugerir e recomendar a adoção do coeficiente N_{od} , para a contabilização do dano em mantos resistentes compostos por blocos de betão, sendo que este fator apenas considera movimentos de blocos superiores a $2D_n$, traduzindo assim o número de blocos deslocados numa faixa do manto resistente de espessura D_n medida ao longo do eixo longitudinal da estrutura (USACE, 2015b):

$$N_{od} = \frac{n^{\circ} \text{ de unidades deslocadas da posição inicial}}{\text{largura da secção / diâmetro do bloco}} \quad [6]$$

Em suma, seriam assim contempladas duas abordagens para determinar o dano no dimensionamento de mantos resistentes de quebra-mares em taludes, nomeadamente através da apreciação da área erodida da estrutura ou através do número de blocos deslocados de uma área de referência em particular. Os fatores aplicados para os blocos de enrocamento, cúbicos e tetrápodes são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Valores dos fatores S e N_{od} , para diferentes classes de blocos.

Bloco	Talude	Início do dano	Dano intermédio	Ruína	Autor	Referência
Enrocamento (S)	1:1,5	2	3-5	8	van der Meer (1988)	USACE (2011)
	1:2	2	4-6	8	van der Meer (1988)	USACE (2011)
Cubos (N_{od})	1:1,5	0	-	2	van der Meer (1988)	USACE (2011)
		0,2-0,5	1	2	-	CIRIA <i>et al.</i> (2007)
Tetrápodos (N_{od})	1:1,5	0	-	1,5	van der Meer (1988)	USACE (2011)
		0,2-0,5	1	1-5	-	CIRIA <i>et al.</i> (2007)

Mais tarde, CIRIA et al. (2007) recomendaram, para efeitos de dimensionamento, a utilização de valores dentro do intervalo $2 \leq S_d \leq 3$, referindo no entanto que pode ser igualmente recomendado e tolerável, para condições mais específicas, a utilização de valores dentro do intervalo $4 \leq S_d \leq 5$, em função do período de vida útil da estrutura de proteção e da reabilitação prevista para esta.

As estruturas de proteção costeira são classificadas convencionalmente em função do seu número de estabilidade, N_s . Relativamente à opção pela implementação de uma estrutura de proteção em taludes, o número de estabilidade deve-se situar dentro do intervalo $1 \leq N_s \leq 4$.

Serão abordados em seguida os estudos com base nas formulações de Hudson e van der Meer que se enquadram, de forma objetiva, no projeto a implementar no Porto de Leixões.

3.3.3.1. Fórmula de Hudson

O modelo de cálculo de Hudson é um método de formulação analítico concebido em 1959, sendo hoje em dia uma norma de cálculo aplicada usualmente na determinação da massa dos blocos, geralmente em material de enrocamento, para constituição do manto resistente de um quebra-mar convencional.

Através de expressões de cálculo obtidas após a análise de um grande conjunto de ensaios em modelo físico reduzido, implementados em estruturas de enrocamento com núcleo permeável e sem galgamento, é possível determinar a massa, M_{50} , ou o peso, W_{50} , médio dos blocos de enrocamento a aplicar na constituição do manto resistente demonstrado pela seguinte expressão (CIRIA et al., 2007):

$$W_{50} = \frac{\rho_r g H^3}{K_D \Delta^3 \cot \alpha} \quad [7]$$

onde:

W_{50} : peso médio do enrocamento ($W_{50} = \rho_r * g * D_{n50}$);

ρ_r : massa volúmica dos blocos rochosos;

H : altura de onda característica no pé do talude;

K_D : coeficiente de estabilidade de Hudson;

Δ : densidade relativa $[(\rho_r \div \rho_w) - 1]$;

$\cot \alpha$: cotangente do ângulo do talude com a horizontal;

ρ_w : massa volúmica da água na qual o bloco está mergulhado.

A fórmula de Hudson pode também ser enunciada em função do número de estabilidade, N_s :

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad [8]$$

Apesar da formulação de Hudson ter sido preliminarmente concebida com base em ensaios de agitação regular, também é admissível a sua utilização em condições de ondulação irregular, através da substituição de H (altura de onda característica no pé do talude) por H_s (altura significativa de onda) e mais tarde pela substituição por $H_{1/10}$, estando deste modo mais aproximado de um valor mais conservativo, corrigindo assim também os valores de K_D (adaptado de CERC, 1984).

No entanto a aplicação da formulação de Hudson deve limitar-se à fase de pré-dimensionamento para a determinação do peso dos blocos (usualmente de enrocamento) que vão integrar a secção do manto resistente. Pode também ser admissível a sua utilização para efeitos de pré-dimensionamento de mantos resistentes constituídos por blocos artificiais de betão, devendo-se nesse caso substituir o valor de D_{n50} por D_n (aresta do cubo equivalente, ou seja, aresta de um cubo com o mesmo volume de massa do bloco) e o valor de ρ_r por ρ_c (massa volúmica do bloco de betão). Os valores de D_n para blocos cúbicos, tetrápodes, acrópodes e dolos são apresentados no Quadro 6, em função da altura D_i .

Quadro 6 – Valores de D_n para diferentes tipos de blocos em função da sua altura, D_i .

Tipo de bloco	D_n
Cubos	D_i
Tetrápodos	$0,65D_i$
Accropode	$0,70D_i$
Dolos	$0,54D_i$

Como mencionado anteriormente, a fórmula de Hudson ainda é atualmente muito aplicada devido à simplicidade e facilidade de aplicação, assim como à variedade de blocos artificiais para os quais K_D se encontra deduzido, fazendo com que a formulação da mesma se tenha mantido sem grandes alterações de peso até hoje. No entanto, esta é uma expressão que manifesta algumas limitações como o facto da mesma não considerar uma série de aspetos físicos relevantes para a estabilidade hidráulica das estruturas de proteção – não considera a durabilidade de uma intempérie marítima i.e. número de ondas, declividade e período de onda, profundidade relativa e tipo de rebentação.

Além disso, apresenta uma definição do nível de dano muito limitada, bem como o facto de ser uma metodologia de cálculo que está condicionada com a não existência de galgamentos de onda e em que só é recomendada a sua aplicação no pré-dimensionamento de estruturas de proteção com núcleo permeável.

No entanto, alguns destes aspetos que a fórmula de Hudson não contempla estão incluídos implicitamente no valor do coeficiente de estabilidade K_D que, por sua vez, é um parâmetro que se define em função do tipo, forma e local de aplicação do bloco. No caso de o bloco ser de betão artificial, outros fatores a ter em conta são o tipo de colocação do bloco, a rugosidade da camada onde o mesmo se localiza, a capacidade de interligação entre elementos, a permeabilidade da estrutura, o número de camadas integradas em cada setor e a posição da obra face à rebentação das ondas (Costa, 2017).

Quanto à análise do dano associado em fase de projeto, esta formulação é aplicável se for considerado um dano fixo equivalente, no intervalo entre 0% a 5%, ilustrativo do número de elementos do manto deslocados da zona entre a crista do coroamento e o nível correspondente à diferença entre o nível do mar e a altura de onda. Dentro deste intervalo de dano os valores de K_D integram-se assim para com o critério de não dano que é o pressuposto recomendado para efeitos de projeto (CIRIA et al., 2007).

Os valores de K_D publicados no Quadro 7 devem servir apenas como indicação preliminar do tamanho dos blocos, a confirmar com a implementação e análise de ensaios em modelo físico reduzido a realizar posteriormente. Estes valores permitem alargar a utilização da metodologia de Hudson ao dimensionamento de mantos resistentes constituídos por uma vasta gama de blocos artificiais.

Quadro 7 – Valores característicos do coeficiente de estabilidade (K_D) para diferentes tipos de blocos.

	Tronco			Cabeça			Referência
	K_D		cotg α	K_D		cotg α	
	zona de rebentação	fora da zona de rebentação		zona de rebentação	fora da zona de rebentação		
Enrocamento (2 camadas)	3,5	4	1,5 a 5,0	2,9	3,2	1,5	CERC (1975)
				2,5	2,8	2	
				2	2,3	3	
Tetrápodo (2 camadas)	2	4		1,9	3,2	1,5	CERC (1984)
				1,6	2,8	2	
				1,3	2,3	3	
Cubo modificado (2 camadas)	7,2	8,3	5,9	6,6	1,5	CERC (1975)	
			5,5	6,1	2		
			4	4,4	3		
			5	6	1,5		
Cubo Antifer (2 camadas)	7	8	4,5	5,5	2	CERC (1984)	
			3,5	4	3		
			-	5	1,5 a 3		
Cubo modificado (2 camadas)	6,8	7,8	-	5	-	CERC (1975)	
	6,5	7,5	-	5	-	CERC (1984)	
Cubo Antifer (2 camadas)	7	8	2	-	-	-	CIRIA (2007)
Dolos	16	32	2	8	16	2	
Accropode™	15		1,33 a 1,5	12		1,33 a 1,5	CLI (2004)
Accropode™II	16			12,3			
Core-Loc™	16			13			
Xbloc®	16			13			
Cubipod (1 camada)	28		1,5	7		1,5	Medina <i>et al.</i> (2012)
Cubipod® (2 camadas)	12		1,5	-		1,5	

3.3.3.2. Fórmula de van der Meer

Perante cenários de zonas marítimas enquadrados em ambientes de grande profundidade, em que a rebentação de ondas não esta limitada a esse fator e perante as manifestas limitações da metodologia de Hudson, van der Meer (1987) apresentou uma fórmula empírica baseada em estudos em modelo físico reduzido com mantos de enrocamento. Este método de cálculo, contrariamente ao método de Hudson, já consideraria na sua avaliação os efeitos de fatores como o caráter irregular da agitação marítima, a permeabilidade do núcleo do manto resistente, a duração da intempérie marítima, fazendo igualmente a distinção entre as condições de agitação (de fundo ou mergulhante), sendo por isso um método muito mais conservativo. As estruturas são assim pré-dimensionadas para a possibilidade de um maior nível de dano, ao contrário do método de Hudson que tem em conta um nível fixo de dano estrutural.

Assim, este investigador admitiu que o efeito do período de onda está associado à forma e declividade da ondulação incidente, incluindo assim no seu método de cálculo o número de Iribarren.

Desta forma, para o cenário de enrocamento natural e rebentação mergulhante ($\xi_m < \xi_{cr}$), tem-se:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6,2P^{0,18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad [9]$$

Enquanto para o cenário de enrocamento natural e rebentação de fundo ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) tem-se:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = P^{-0,13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad [10]$$

onde:

H_s : altura de onda significativa no pé do quebra-mar ($= H_{1/3}$);

S_d : nível de dano adimensional;

N : número de ondas incidentes no pé do quebra-mar (duração do temporal) ($N \leq 7500$);

$\cot \alpha$: cotangente do ângulo do talude com a horizontal;

ξ_m : número de Iribarren;

Δ : densidade relativa do material dos blocos;

P : porosidade da estrutura de talude ($0,1 \leq P \leq 0,6$).

Já a transição entre a rebentação mergulhante e a de fundo pode ser determinada através do valor crítico de Iribarren, ξ_{cr} :

$$\xi_{cr} = [6,2P^{0,31}\sqrt{\tan \alpha}]^{\frac{1}{P+0,5}} \quad [11]$$

Esta transição é definida invariavelmente pelo talude da estrutura e não pelo talude natural (CIRIA et al., 2007).

Como já foi referido anteriormente, van der Meer procedeu à introdução do fator de dano na estrutura, com a hipótese do mesmo poder ser muito variável tendo em conta todos os parâmetros que a metodologia do investigador engloba.

Nas equações concebidas para cenários de mantos resistentes compostos por enrocamento, e rebentação mergulhante ($\xi_m < \xi_{cr}$) ou rebentação de fundo ($\xi_m \geq \xi_{cr}$), o dano é definido em função da área de talude erodida através do parâmetro S_d . No caso dos mantos resistentes serem compostos por blocos artificiais de betão este parâmetro apresenta algumas limitações devido à dificuldade em definir um perfil da superfície e, por isso, para efeitos de dano nos blocos, admite-se geralmente o dano como o número de elementos que se deslocam numa distância maior que o seu diâmetro nominal, D_n (van der Meer, 1988).

Posteriormente, no seguimento da evolução que houve através de diversos estudos, o “*The Rock Manual*” (CIRIA et al., 2007) estabelece que, no caso de blocos artificiais de betão dispostos aleatoriamente, o dano pode ser quantificado através dos números de dano N_d e N_{od} . O valor de N_d representa o número de blocos artificiais de betão, neste caso como percentagem do número total

de elementos colocados a uma certa distância do nível da água, em que pode ser considerada uma distância de $\pm 1,0 H_s$ (altura de onda de projeto), e N_{od} representa o número de blocos artificiais de betão deslocados numa faixa de talude com largura D_n (diâmetro nominal do bloco).

No Quadro 8 estão apresentados os valores de N_{od} para elementos de tetrápodes consoante o nível de dano particular associado.

Quadro 8 – Número de dano característico N_{od} para elementos de tetrápodes consoante o nível de dano particular (CIRIA et al., 2007).

Número de dano	Nível de dano		
	Início do dano	Dano intermédio	Ruína
N_{od}	0,2-0,5	1	1-5

Mais tarde, van der Meer (1988) desenvolveu outras fórmulas de estabilidade para vários tipos de blocos artificiais de betão, nomeadamente para mantos com duas camadas de cubos de betão e para mantos com duas camadas de tetrápodes.

Prosseguem-se os cálculos de pré-dimensionamento do talude posterior, da cabeça do quebra-mar e da risberma, assim como a definição da secção transversal da estrutura, altura e largura do coroamento, espessura de camadas e filtros a implementar. Estes cálculos não se enquadram integralmente no tema desta dissertação e, portanto, não irão ser descritos.

3.3.3.3. *Ensaio em Modelo Reduzido*

A forma trapezoidal dos quebra-mares de taludes implica a empregabilidade de um enorme volume de material pétreo na sua construção, seja na forma de agregados para betão, seja na forma de enrocamentos. A sua viabilidade económica passa necessariamente pela otimização do perfil transversal da estrutura através da aplicação de materiais de maior qualidade nas zonas mais solicitadas, permitindo que as zonas menos solicitadas possam ser executadas com materiais de menor qualidade, e como tal, mais acessíveis economicamente.

No entanto, a análise e otimização de recursos financeiros pode levar à reformulação do projeto para satisfazer as necessidades que se requerem para este tipo de obras no seu todo. Por isso, a realização de ensaios em modelo reduzido que consigam representar as características das estruturas e da sua área envolvente, continuam a constituir o meio mais seguro para a verificação e validação do protótipo do modelo físico que se pretende. Continuam, igualmente, a constituir o meio mais seguro para se conseguir uma melhor otimização do projeto de implementação da obra em causa. Em fase de testes deve-se restringir as alternativas a serem ensaiadas a um mínimo para minorar os custos económicos dos ensaios e devem-se validar os resultados do pré-dimensionamento (Costa, 2017).

3.3.4. Tipos de Ruína e Fenómenos Associados

Durante a sua vida útil, as estruturas de quebra-mares estão sujeitas a fenômenos associados à agitação marítima. Este tipo de eventos de características dinâmicas e aleatórias requerem, por isso, uma forte análise de investigação baseada não só na sua eventual ação em certos períodos do ano, como também nos efeitos adversos associados a esse fator.

Este enquadramento não é diferente quando se projeta uma estrutura de proteção costeira, como por exemplo um quebra-mar de tipologia de taludes. Por isso, para um dimensionamento adequado de uma estrutura nestes moldes, é fundamental que se promova a uma correta percepção de todos os eventuais fenômenos oceânicos que possam vir a ocorrer de forma a minorar todas as possíveis consequências associadas aos mesmos.

Os principais fenômenos de agitação marítima associados à ruína de uma estrutura de proteção são, entre outros, o espraçamento, o refluxo, os galgamentos, reflexão e transmissão de ondas, esquematizados na Figura 23.

Os processos de espraçamento e refluxo são fenômenos físicos que resultam da ação cíclica da agitação marítima com o talude anterior dos quebra-mares, provocando escoamentos turbulentos ao longo do talude da estrutura. O refluxo é o fenômeno de maior instabilidade hidráulica para os blocos integrados no setor do manto resistente. O fenômeno de galgamento é aquele que ocorre quando a massa de água atinge a área posterior de uma estrutura de quebra-mar, pois a cota de coroamento do quebra-mar não tem altura suficiente para que a água não galgue por cima desta. O fenômeno de reflexão é um processo caracterizado pela interação da agitação marítima com a estrutura de quebra-mar em que parte da energia das ondas quando atingem a estrutura costeira são refletidas, sendo este fenômeno tanto mais acentuado quanto menos porosa e mais inclinada for a estrutura. Por fim, o fenômeno de transmissão é o processo que caracteriza a dissipação ou propagação da energia de ondas para o interior das bacias portuárias, sendo que um dos principais objetivos aquando do dimensionamento de um quebra-mar é que este assegure que o fenômeno de transmissão marítimo se processe dentro dos valores admissíveis para a estrutura, e que assim seja garantida a funcionalidade da estrutura dentro do menor dano possível.

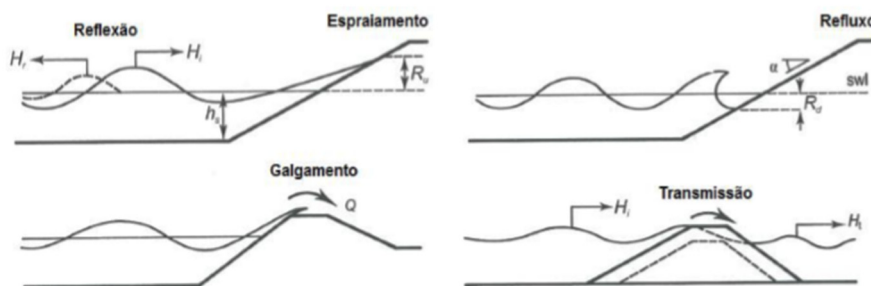


Figura 23 – Interação dos principais fenômenos de agitação marítima associados à ruína de um quebra-mar de taludes (adaptado de CIRIA et al., 2007).

Em suma, todos estes fenómenos referidos anteriormente podem levar ao colapso total e funcional de uma estrutura de quebra-mar de taludes, sendo por isso determinante implementar ações de modo a minorar os efeitos dos mesmos. É essencial realizar um correto dimensionamento em fase de projeto da estrutura, bem como estudos criteriosos de todos os fenómenos de agitação marítima característicos da área onde a obra de proteção será implantada.

No entanto, deve também ser referido que um quebra-mar de taludes pode vir a sofrer danos de grande relevância e, contudo, não atingir a ruína, mantendo a funcionalidade que se pretende ao nível de proteção das infraestruturas portuárias que este abrange.

Habitualmente, a instabilização hidráulica do manto resistente e o deslocamento dos blocos que se encontram na zona ativa do talude para as zonas inferiores, que conseqüentemente promovem a exposição das camadas inferiores do talude e a erosão do coroamento devido à severidade da agitação marítima, são os principais precedentes para o colapso de um quebra-mar de taludes. Outros fatores que estão na origem do colapso destas estruturas são a existência de correntes na zona de implantação do quebra-mar e fenómenos de infraescavação que podem provocar a erosão do pé de talude e a destruição do mesmo, pois com o colapso da base da estrutura, os blocos do manto resistente começam a desmoronar por deixarem de ter suporte, expondo assim as camadas interiores do quebra-mar à ação direta da agitação marítima.

Para além destes fatores também se podem mencionar os assentamentos globais ou diferenciais da estrutura, fruto do elevado peso dos elementos constituintes da mesma, e a quebra de blocos isolados do manto resistente (Costa, 2017).

Na Figura 24 estão esquematizados os principais fenómenos de colapso de um quebra-mar em taludes.

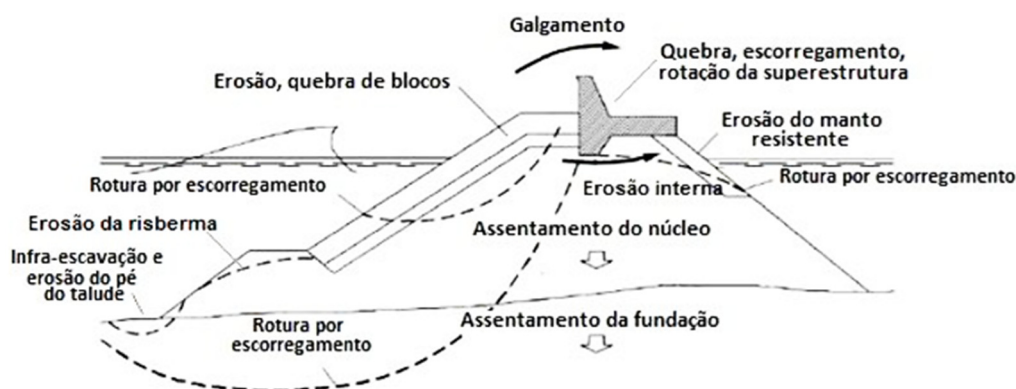


Figura 24 – Esquematização dos fenómenos de colapso típicos de uma estrutura de quebra-mar em taludes (adaptado de USACE, 2015).

No entanto, tal como referido anteriormente, este tipo de estrutura de proteção pode vir a sofrer grandes deformações ou mesmo estragos relevantes e, no entanto, continuar a ser capaz de cumprir a função para a qual foi dimensionada (Costa, 2017).

3.3.5. *Fase de Construção*

As estruturas costeiras são obras que, antes de serem implementadas, requerem uma atenção especial numa fase preliminar, pela magnitude que envolve a sua implementação e, posteriormente, pelos objetivos e condições a que estes tipos de elementos irão estar expostos no decorrer da sua vida útil.

As estruturas de quebra-mares são obras de proteção costeira que se enquadram particularmente nesta situação. Por isso, a requalificação do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, por via da extensão do atual quebra-mar em taludes, é um exemplo prático de um elemento de proteção portuária que será desenvolvido em pormenor nesta dissertação. Embora o seu processo construtivo seja relativamente simples, este envolve uma estruturação muito própria e delicada tendo em conta a envergadura que estes tipos de projetos requerem. A quantidade de mão-de-obra e de meios necessários ao empreendimento de um quebra-mar é comumente expressiva. Desta forma, todo o planeamento, coordenação e monitorização envolvente a uma obra desta natureza tornam-se extremamente exigentes.

Em função disso, é fundamental antever de forma precisa qual será o desenrolar da empreitada para conseguir conciliar todas as etapas e processos construtivos com condições meteo-marítimas favoráveis, de forma a salvaguardar assim não só toda a logística circundante às frentes de trabalho, como também toda a execução da própria estrutura. Esta deve manter-se estruturalmente consistente durante toda a empreitada, justamente durante os meses de maior agitação marítima. Além disso, as condições geomorfológicas e climatéricas do local onde se vai realizar a obra, a disponibilidade de mão-de-obra qualificada, a existência de materiais e de equipamentos de apoio à obra e boas condições de acessibilidade terrestres e/ou marítimas para o seu transporte são outros pormenores a ter em consideração.

A escolha do equipamento a utilizar na execução das várias componentes da estrutura dependerá sempre da sua dimensão, das condições geomorfológicas do local, da disponibilidade, das condições de acessibilidade terrestres e/ou marítimas e necessariamente das condições climatéricas.

Todavia, o empreendimento deste tipo de elementos é executado com base numa combinação de operações terrestres e marítimas, conjugadas não só com a etapa da obra que está a decorrer, assim como com o nível de complexidade das operações envolventes a essa mesma fase de construção.

Em suma, uma boa planificação preliminar de todo o procedimento construtivo baseada na realização de uma série de ações de preparação e organização antes das obras serem instauradas será crucial no sucesso do projeto. Essas ações envolvem convencionalmente estudos de investigação precisos, designadamente sobre as condições meteorológicas e batimétricas do local,

bem como outras atividades, nomeadamente exames de investigação da propagação da ondulação durante as diferentes fases construtivas em ensaios de modelo reduzido. O objetivo destes estudos é facilitar uma melhor perceção de eventuais situações-limite de risco, conseguindo-se dessa forma definir quais as medidas a aplicar caso essas condições se verifiquem. A adaptabilidade a cenários adversos que possam vir a ocorrer, interligados essencialmente a possíveis eventos meteorológicos adversos, de forma a possibilitar não só a mitigação de eventuais danos na estrutura provisória, como também a possibilitar a proteção de equipamentos e vidas humanas, é outro preceito indispensável que deve ser muito bem estimado (Costa, 2017).

3.3.5.1. *Sequência Construtiva*

O encadeamento construtivo de estruturas de quebra-mares, especificamente de quebra-mares em taludes, apesar de seguirem uma cadência simples em termos da sua implementação, podem sofrer variações de obra para obra. Essa circunstância está dependente de múltiplos fatores, designadamente de índole geomorfológica e climatérica da zona, do tipo de equipamentos disponíveis e de outros critérios económicos e ambientais.

É fundamental ter uma idealização presumível e preliminar no sentido de perceber se a empreitada será executada maioritariamente por via terrestre, por via marítima, ou por combinação otimizada destas duas hipóteses.

Habitualmente, a execução da obra por via terrestre é mais acessível em termos económicos do que por via marítima, particularmente se as pedreiras de origem dos enrocamentos forem relativamente próximas e for possível o acesso direto do material por via terrestre às frentes de trabalho. No entanto, devido a aspetos geomorfológicos e ambientais existem cenários em que a execução da empreitada por via terrestre/marítima se revela como a opção mais favorável em obras desta magnitude.

Convencionalmente, a construção de um quebra-mar de taludes é efetuada executando-se inicialmente as camadas do interior e subsequentemente as camadas do exterior por frentes de trabalho espaçadas de escassas dezenas de metros. É primordial, numa obra deste cariz, minorar a exposição do material mais fino das camadas mais interiores à ação da agitação marítima, protegendo-o assim que possível com material de maior dimensão (CIRIA et al., 2007).

No caderno de encargos deve estar definido que tipo de equipamento de apoio à obra se encontra utilizável, pelo menos numa fase preliminar de consecução da mesma, pois o facto dos dispositivos mecânicos serem transportados por via terrestre ou marítima irá condicionar desde logo toda a geometria da estrutura.

O recurso a equipamento marítimo para colocação de material será eventualmente inevitável no caso de a empreitada ser executada em zonas de grande profundidade. Este tipo de equipamentos

permitem aceder a zonas da estrutura onde o alcance das gruas seria insuficiente, como é o caso do núcleo.

Na Figura 25 encontra-se representada em (a) a sequência construtiva de um quebra-mar em taludes com utilização de equipamento terrestre, em (b) a sequência construtiva de um quebra-mar em taludes com utilização de equipamento marítimo e, por fim, na representação (c) a sequência construtiva de um quebra-mar em taludes recorrendo a utilização de ambos os equipamentos, marítimo e terrestre.

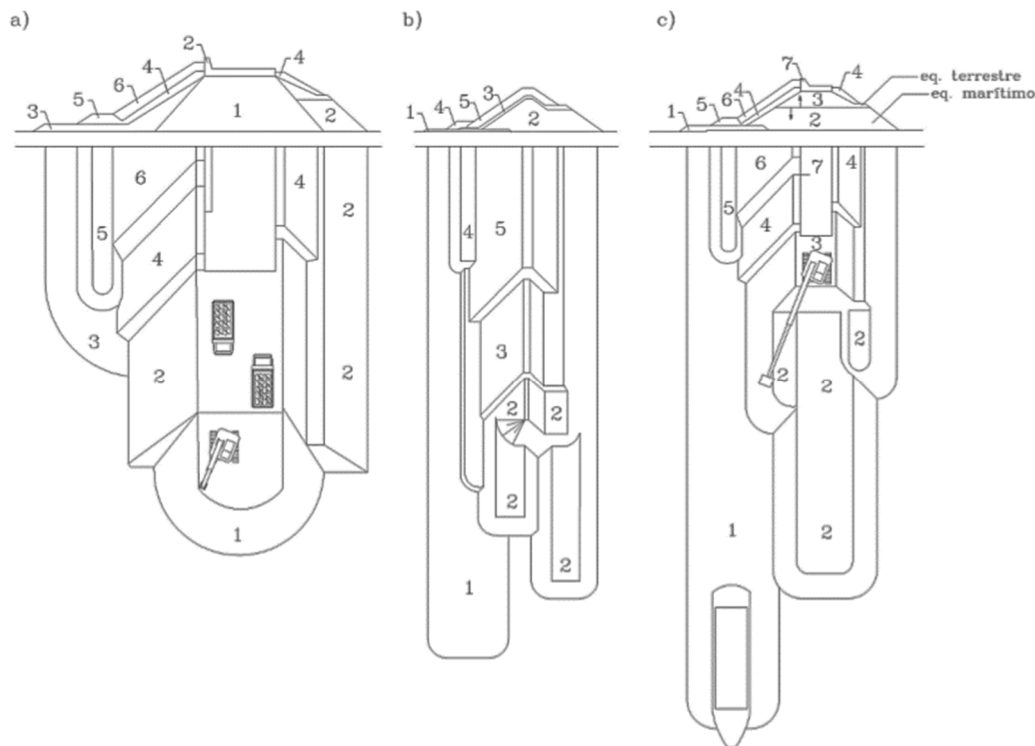


Figura 25 – Encadeamento construtivo de uma estrutura de quebra-mar em taludes consoante o tipo de equipamento utilizado (adaptado de CIRIA et al., 2007).

3.3.5.2. Empreitada por Via da Utilização de Equipamento Terrestre

Uma estrutura de quebra-mar só pode ser implementada com recurso a equipamento estritamente terrestre se os dispositivos mecânicos que servirão de apoio à consecução da obra conseguirem alcançar o coroamento da estrutura. Com este método pretende-se conseguir implantar uma plataforma de trabalho que terá obrigatoriamente de estar a uma cota superior da preia-mar máxima. Sendo assim, a largura do coroamento estará sempre dependente da largura da plataforma de trabalho que será efetivamente necessária para todo o funcionamento e movimentação dos dispositivos mecânicos de apoio à obra.

Em seguida, na Figura 26, encontram-se representados três esquemas, relativos à largura mínima do coroamento, com a interseção de alguns modelos de equipamentos terrestres utilizados na implementação de um quebra-mar em taludes que só se conseguem encontrar paralelamente se a plataforma dispuser das dimensões mínimas necessárias (CIRIA et al., 2007).

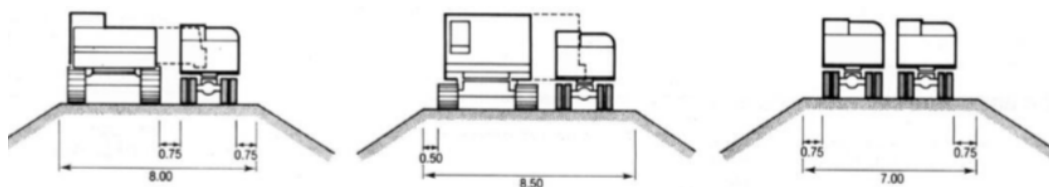


Figura 26 – Representação da largura mínima do coroamento com o cruzamento de alguns modelos de equipamentos terrestres utilizados na implementação de um quebra-mar de taludes (CIRIA et al., 2007).

Habitualmente, a implementação de um quebra-mar em taludes por intermédio somente desta orientação enceta-se primordialmente com a execução do núcleo, colocando o grosso do material através de camiões a partir da plataforma de trabalho e avançando paulatinamente à medida que esta se vai expandindo.

Os taludes do núcleo são implementados com recurso a utilização de guas ou escavadoras, ficando normalmente o núcleo com inclinação de 4:3, equivalente ao ângulo de atrito interno do TOT (ver Figura 25a). Logo após a execução desta operação aplica-se um material próprio de fundação com o intuito de salvaguardar o talude devido à infraescavação empreendida neste.

Segue-se a execução do submanto com recurso à utilização de guas ou escavadoras, podendo este ser igualmente implementado com recurso à utilização de camiões, necessitando arranjar o material por escavadoras antecipadamente, até se atingir o perfil pretendido (Costa, 2017).

3.3.5.3. *Empreitada por Via da Utilização de Equipamento Marítimo*

Caso só seja possível realizar a empreitada de um quebra-mar por via exclusiva de equipamento marítimo, a metodologia operativa inerente é substancialmente diferente daquela que é aplicada na implementação da estrutura exclusivamente por via terrestre.

Desse modo, a primeira etapa convencional de uma empreitada deste formato consiste na execução do núcleo. Este processo deve decorrer em paralelo com a implantação da fundação do talude para o preservar da infraescavação, possibilitando não só o balizamento na colocação do material do núcleo, como também a monitorização em termos da erosão do material empregue provocada pelas correntes que se passam a amplificar em redor da estrutura. A implementação do núcleo pode ser realizada por descarga direta das embarcações ou pela combinação de guas flutuantes e barcaças, o que facilita o ajustamento e arranjo dos taludes até se atingirem as inclinações pretendidas para os mesmos.

Logo após o cumprimento destas operações são executados o submanto, o pé do talude e o manto resistente por esta ordem. Contudo, a execução do submanto em condições íntegras é sempre influenciada pela distribuição e disposição dos blocos que irão constituir este setor, como acontece com a implementação do núcleo deste elemento de proteção. Por isso, ambos os setores devem ser executados com recurso à utilização de pontões flutuantes com grua para a colocação individual

dos blocos, de forma a assegurar o cumprimento das especificações do caderno de encargos a nível de densidade de distribuição e disposição dos blocos e da espessura das camadas.

Até uma altura de pelo menos 1,5 a 2,0 vezes o valor de H_s , abaixo do nível mínimo do mar podem ser utilizadas embarcações próprias para trabalhos desta natureza de modo a que o material seja distribuído e colocado por descarga direta na zona submersa dos mantos (CIRIA et al., 2007).

3.3.5.4. Empreitada por Via da Utilização de Recursos Terrestres e Marítimos

Como já antecipado anteriormente, a construção de um quebra-mar de taludes envolve inúmeros fatores que devem ser considerados antes da execução de uma obra desta envergadura. Por isso, uma das soluções que melhor abrange muitos dos aspetos associados à implementação deste tipo de estruturas, e que melhores respostas oferece a todo o tipo de contingências admissíveis a ocorrer neste quadro, é a execução da empreitada por via terrestre e marítima. Esta opção permite o desenvolvimento de várias frentes de trabalho de uma forma sincronizada, sendo uma alternativa que, dependendo da relevância do projeto, pode vir a ser a escolha mais vantajosa no contexto económico-operacional.

Sendo assim, a empreitada de um quebra-mar de taludes por via da utilização de recursos terrestres e marítimos inicializa-se preliminarmente com a execução da fundação do talude por descarga direta de material por embarcações. Em seguida procede-se à implementação do núcleo por meio da descarga de material executado por embarcações próprias nas partes submersas do perfil até 3 m abaixo do nível de baixa-mar, e por camião a partir dessa cota (CIRIA et al., 2007).

Assim que a secção do núcleo fica concluída é executada a correção da inclinação dos taludes e procede-se consecutivamente à implementação do submanto por intermédio de gruas ou escavadoras, garantindo assim que se atinjam os perfis pretendidos.

Após a elaboração do submanto, procede-se à colocação do pé do talude que, por estar diretamente relacionado com a estabilidade do manto resistente, deve ser implementado com o maior rigor possível para assim salvaguardar todo o suporte que é necessário prover à camada mais exterior do quebra-mar.

Terminados os trabalhos de distribuição e disposição dos materiais das camadas mais íferas, procede-se à colocação dos blocos do manto, sendo esta operação executada por intermédio de gruas ou escavadoras de acordo com o padrão de colocação pretendido e proposto no caderno de encargos.

Finalmente, procede-se à instituição da superestrutura que pode ser executada ou por secções pré-fabricadas ou por betonagem *in situ* (ver Figura 27) (Costa, 2017).

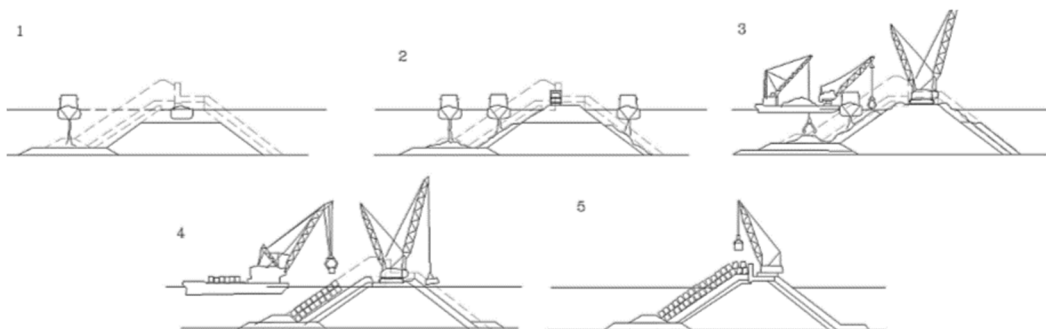


Figura 27 – Esquemática de todo o encadeamento construtivo de um quebra-mar de taludes por camadas por via da utilização de recursos terrestres e marítimos (Costa, 2017).

3.3.5.5. Monitorização e Preservação

Como já mencionado ao longo deste trabalho, a componente empírica interligada ao *know-how* experimental concernente à realização de empreitadas com estas características é um dos aspetos mais significativos para o sucesso estrutural e operacional deste tipo de elementos durante a sua vida útil.

Sendo assim, os ensaios em modelo reduzido, apesar de serem bastante condicionados pelos efeitos relacionados com a escala entre o modelo pretendido e o protótipo em estudo, têm um papel fundamental. Além de possibilitarem o ajustamento do projeto aos resultados dos ensaios, permitem igualmente que sejam tidos em conta todos os critérios alusivos aos parâmetros e condições locais não considerados no pré-dimensionamento.

Por isso, em ambiente laboratorial intenta-se sempre minimizar os efeitos de escala entre o modelo e o protótipo, pretendendo que as condições de semelhança entre os dois elementos seja assegurada e para que a apreciação ao comportamento do elemento padrão após ensaios estruturais permita validar os pressupostos adotados em fase de projeto. Todavia, todas as formulações obtidas são válidas apenas para uma determinada gama de validade, estando no entanto muito suscetíveis a significativas margens de erro em consequência da elevada dispersão de resultados e das especificidades de cada estrutura simulada.

Em suma, o conhecimento de engenharia costeira adquirido com a execução de obras anteriores e a constante monitorização do desempenho funcional de muitas destas estruturas na atualidade tem um papel basilar para a implementação de novos elementos de proteção costeira e para que seja possível antecipar e programar eventuais trabalhos de manutenção e restauro. O facto do colapso deste tipo de estruturas não ser habitualmente repentino permite que estes tipos de trabalhos ocasionais se desenvolvam entre tempestades, nomeadamente pela substituição de blocos danificados ou deslocados.

Sendo assim, é fundamental dispor de propostas de monitorização para este tipo de estruturas que, de um certo modo, possibilitem que se consiga atuar atempadamente evitando o adensamento de

danos subsequentes nestas. Uma adequada e disciplinada interpretação e intervenção em termos da avaliação de patologias presentes no elemento de proteção poderá poupar milhões de euros de investimento na reabilitação ou requalificação deste tipo de infraestrutura marítima.

3.4. Dragagem

A técnica de dragagem é um procedimento de recolocação de sedimentos ou de outros materiais subjacentes à superfície terrestre para efeitos de construção e manutenção de vias aquáticas, infraestruturas de transporte, aterros, mineração e recuperação de solos. Esta operação pode ser efetuada anteriormente, ou em simultâneo, a uma obra marítima, de forma a alimentar recursos passíveis de serem aproveitados para este efeito.

A otimização a partir da implementação de numerosos estudos e técnicas para a disposição adequada dos resíduos de dragagem deveu-se, sobretudo, à conscientização ambiental que direcionou a atenção das autoridades ambientais, e da opinião pública em geral, fazendo com que a disposição dos mesmos deixasse de ser desregrada e atendesse a um conjunto de normas específicas. Dessa forma, todo este novo enquadramento promoveu um acentuado aumento de custos, bem como a um aumento da complexidade operacional deste tipo de atividade (Anish, 2020).

Por isso, a partir desta nova ótica, o material dragado deixou de ser considerado um simples resíduo e passou a ser visto como um recurso natural importante e passível de aproveitamentos múltiplos, especificamente em obras de natureza marítima.

3.4.1. Metodologia e Critérios de Implementação

Quando se pretende levar a cabo um projeto de dragagem de um determinado solo devem ser tidos em conta um conjunto de diligências, entre elas a quantificação e a identificação do material a ser dragado (designadamente as suas características físicas e químicas), o pré-estabelecimento dos objetivos pretendidos, o local para a deposição dos sedimentos, a estruturação do respetivo plano de dragagem e do tipo de equipamento a utilizar e, por fim, a verificação e identificação de todos os fatores sociais, ambientais e institucionais envolvidos.

O processo de dragagem pode ser classificado convencionalmente em quatro diferentes categorias:

- Dragagem de aprofundamento ou de fundação: processo que consiste na remoção de solos, geralmente compactos, com intuito de serem criadas condições para a implementação de bacias portuárias, canais de acesso, estruturas de proteção costeira ou lagos em áreas não dragadas previamente;
- Dragagem de manutenção: processo que consiste na remoção de solos, geralmente não compactos, decorrente da deposição de material assoreado que se foi acumulando ao longo do leito de um determinado canal hídrico de forma natural, e não só. Este tipo de

dragagem é geralmente desenvolvido com o intuito de manter a profundidade de projeto de um canal aquático comum;

- Dragagem de remediação ou ambiental: processo que consiste na remoção de solos contaminados depositados numa determinada área para uma futura utilização da mesma em condições de segurança adequadas;
- Dragagem de mineração: processo que consiste na remoção de solos compostos por minérios para a extração dos minerais presentes nos mesmos, particularmente se o agregado em causa tiver valor económico.

O processo de dragagem pode ser desempenhado através da utilização de três categorias de equipamentos, mais concretamente equipamentos mecânicos, hidráulicos e pneumáticos (Vlasblom, 2003; Lima, 2008).

3.5. Desmorte

Depois de abordado o processo de dragagem, que tem como principal objetivo a remoção e recolocação de todo o tipo de sedimentos, será agora descrito o processo de desmorte que retrata o desmantelamento de todo o tipo de rochas duras, e não só.

Os dois principais métodos de desmorte de rochas consistem na decomposição das mesmas a quente, com recurso ao uso de explosivos, ou a frio com recurso a equipamentos de percussão (Lima, 2008).

A draga de corte e sucção (*cutter suction dredger*) é um exemplo de um equipamento de desmorte mecânico. É utilizado principalmente em meios fluviais com a função de dragar sedimentos de baixa densidade e diâmetros menores. No entanto, também pode ser indicado para material aluvionar coesivo ou rochas brandas quando se acopla um desagregador. Por outro lado, este é um equipamento que necessita de manutenção constante devido à maior granulometria do material dragado. Outro inconveniente deste equipamento é a rigidez das suas condutas que podem provocar alguns problemas operacionais aquando da presença de alguma agitação marítima (adaptado de Lima, 2008).

Seguidamente será descrito o método de desmorte de rocha a quente com recurso de explosivos, apesar de que no projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, o substrato rochoso será desmontado e dragado por dragas de corte e sucção, já descritas no parágrafo anterior.

3.5.1. Desmorte Subaquático

Um dos principais métodos de desmantelamento de rocha a quente é o desmorte subaquático com recurso a explosivos.

Sendo assim, quando se pretende executar uma atividade desta natureza é necessário acompanhar a evolução de diversos fatores para a consumação do procedimento em causa devido a todo o tipo de implicações presentes.

Em razão disso, alguns dos aspetos a ter em conta para a consecução deste tipo de atividades são as possíveis interferências das mesmas com o tráfego transcorrido em vias próximas, as condições de tempo e de visibilidade abaixo de água prevaletentes, as possíveis dificuldades na locação dos furos e na colocação das cargas explosivas, a vibração do terreno, o impacto do ar e a ocorrência de fenómenos de ultralancamento (projeção de fragmentos de rocha afora da área de operações), a existência de sedimentos sobre o material a desmontar, os possíveis danos excedentes no maciço rochoso ou em estruturas existentes devido à pressão hidrodinâmica e, por fim, a segurança dos trabalhadores envolvidos nas operações.

Não obstante de todo o acautelamento inerente à realização deste tipo de atividade, o desmonte subaquático com recurso a explosivos não sofreu grandes alterações nas últimas décadas no que concerne aos métodos de trabalho, sendo priorizadas fundamentalmente todas as vicissitudes correlacionadas com potenciais prejuízos em seres humanos, seguido de bens materiais ou de danos ambientais.

Como curiosidade, é importante referir igualmente toda a repercussão envolvente ao surgimento da emulsão, que é uma solução muito mais segura durante o manuseio do que os explosivos “nitroglicerizados”, muito utilizados precedentemente ao aparecimento desta mistura, e que habitualmente ocasionavam a propagação de ondas de detonação de grande magnitude entre furos muito próximos (Lima, 2008).

Existem distintos métodos de perfuração de rochas, bem como de equipamentos disponíveis para esse mesmo efeito. Todavia, alguns destes processos requerem o auxílio metucioso por parte de mergulhadores com experiência neste tipo de atividades, especialmente em ações já com algum grau de conhecimento e exigência, e.g. operações correlacionadas com o posicionamento do martetele no local apropriado de perfuração da rocha para assim ser inserido o explosivo. Já outros métodos exigem somente a utilização de um equipamento próprio transportado por barco para proceder à furação da rocha ou de um disruptor hidráulico para o mesmo efeito.

Assim que qualquer um destes tipos de equipamentos esteja posicionado e ancorado no local que se pretende, procede-se ao posicionamento do perfurador do mecanismo em ação de acordo com o plano de fogo estabelecido (Lima, 2008).

Na Figura 28 encontra-se esquematizado o processo convencional de um desmonte subaquático.

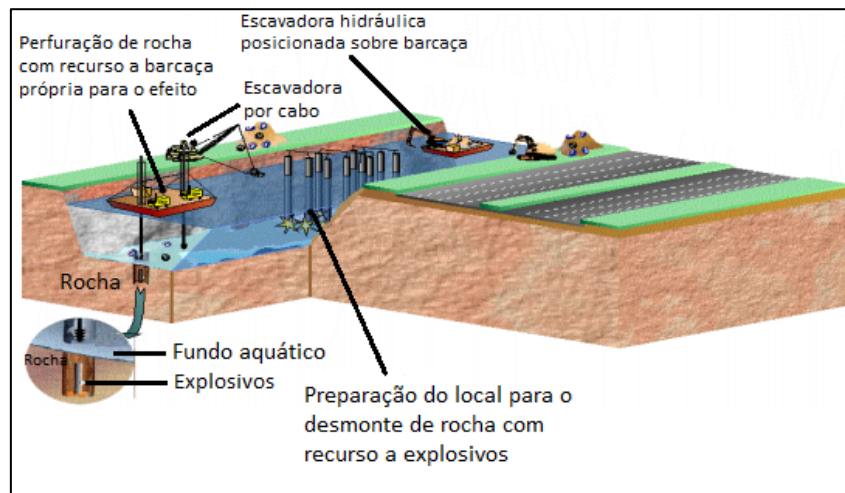


Figura 28 – Esquemática de um processo convencional de desmonte subaquático após se ter procedido ao aprofundamento do canal aquático por dragagem (adaptado de Lima, 2008).

Na Figura 29 está representado um perfil-tipo de um plano de fogo utilizado em desmontes subaquáticos. A escolha da malha é estipulada pela granulometria do material recolhido na limpeza dos furos.

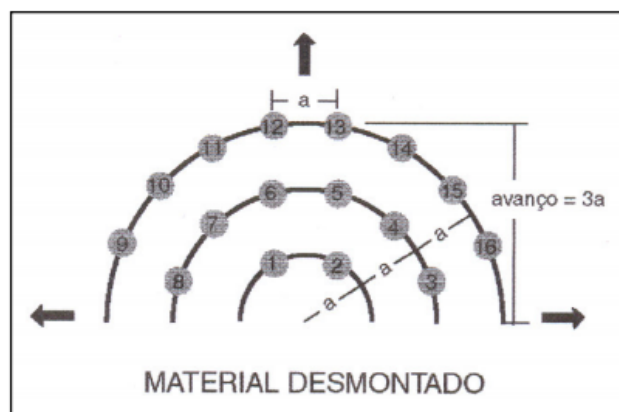


Figura 29 – Representação de um perfil-tipo de um plano de fogo utilizado em desmonte subaquático (adaptado de Lima, 2008).

3.6. Utilização de Quebra-mares em Outras Infraestruturas Portuárias

As permutas comerciais por via marítima foram sempre essenciais na evolução e expansão dos territórios de qualquer civilização e em qualquer momento da História.

Desde sempre, essas mesmas civilizações tentaram fixar-se em áreas com características naturais e que oferecessem espaços com condições de proteção exigíveis, de forma a ficarem salvaguardados da severidade da agitação marítima ocorrente, e que estivessem reunidos os mínimos requisitos à implantação de infraestruturas portuárias. Tendo em conta este facto, a maioria dos principais portos ancestrais foram implantados em zonas que reuniam grande parte dos padrões mencionados, i.e. em baías abrigadas, por trás de cabos, penínsulas ou ilhas costeiras e inseridos em lagoas ou em estuários. No entanto, muitas destas estruturas já desapareceram,

principalmente pelo colapso das mesmas devido à ocorrência de sismos ou de tempestades avassaladoras.

Com a evolução dos tempos, mesmo com o desaparecimento de muitas estruturas portuárias, viriam a surgir muitas outras da mesma natureza mas, no entanto, sem as mesmas condições de abrigo que as anteriores detinham. Não obstante, apesar de muitas destas infraestruturas marítimas mais recentes não se localizarem em zonas guarnecidas, onde os fenómenos de refração marítima não têm os mesmos impactos significativos na funcionalidade e operacionalidade das mesmas, estas oferecem em contrapartida outro tipo de condições para o desenvolvimento a médio-prazo desses mesmos organismos, nomeadamente ao nível de área de expansão terrestre, ao nível de profundidade dos fundos aquáticos ou em termos de acessibilidades.

Tendo em conta todo este novo contexto, que abrange um grande conjunto de vantagens mas com alguns inconvenientes associados, houve a necessidade de que fossem criadas zonas de proteção artificiais para dar resposta às exigências primárias de abrigo que se requerem e, igualmente, a outros requisitos que possam não estar abrangidos dentro das impossibilidades que são necessárias neste mesmo âmbito.

Ademais, existem algumas alternativas bastante interessantes para preencher todo este tipo de condições fundamentais, mencionadas anteriormente, para estruturas implantadas em locais sem condições de abrigo naturais. Uma das hipóteses mais eficientes, considerada uma das soluções mais adotadas desde sempre para responder a este tipo de carências de forma plena e abrangente, é a construção de quebra-mares ou o prolongamento de estruturas equivalentes já existentes (Lopes, 2005).

Seguidamente serão abordados e descritos alguns exemplos da utilização deste tipo de tecnologia em infraestruturas portuárias atuais, e não só.

3.6.1. Antigo Porto de Alexandria, Egito

O antigo Porto de Alexandria, no Egito, terá sido a primeira infraestrutura portuária de vanguarda a ser implementada pelo Homem, sendo uma estrutura que se encontrava numa posição privilegiada e que tirava partido da localização da ilha costeira de Faros, que fornecia uma zona abrigada à baía da cidade.

Já antes da chegada de Alexandre “o Grande” ao Egito existia uma infraestrutura marítima neste local que, posteriormente à sua chegada, foi reconstruída pelo mesmo aquando da sua incursão no país numa escala prodigiosa em razão da época em que a obra foi idealizada, entre 300 a.C. e 100 a.C.

Algumas das grandes obras implementadas no Porto de Alexandria (ver Figura 30) foram a edificação de três quebra-mares em taludes de enrocamentos. Um deles teria cerca de 1,5 km de

comprimento e servia de ligação entre a ilha de Faros e a cidade de Alexandria; o objetivo era o de criar uma espécie de esfera constituída por duas bacias abrigadas para dois portos distintos: o *Portus Eunostus* e o Grande Porto de Alexandria. Os dois outros quebra-mares foram instituídos para otimizar e aperfeiçoar o nível de condições de segurança e acessibilidade da bacia do Grande Porto de Alexandria (Castro, 2018).



Figura 30 – Ilustração do antigo porto de Alexandria, com o *Portus Eunostus* à esquerda e o Grande Porto de Alexandria à direita (*Portus Magnus*) resguardado por dois quebra-mares em taludes de enrocamento (Fonte: <https://www.guiageografico.com/egito/alexandria/antiguidade.htm>, consultado em setembro de 2020).

3.6.2. Porto de Viana do Castelo, Portugal

O Porto de Viana do Castelo é uma infraestrutura portuária comercial que está sobre jurisdição da APDL e que fica localizado junto à foz do rio Lima, na zona noroeste de Portugal.

Este porto opera 24 horas por dia e 365 dias por ano tendo a capacidade para a movimentação de mais de 900 000 toneladas de carga anualmente, desde carga geral e carga Ro-Ro a outro tipo de cargas, como por exemplo de granéis sólidos/líquidos. Possui, do mesmo modo, condições para a receção de elementos náuticos com um volume total até 180 metros de comprimento e até 8 metros de calado.

Atualmente, esta infraestrutura é considerada um organismo marítimo moderno, além de estar muito bem equipado em termos de condições substanciais. É considerado um porto com condições de navegabilidade relativamente acessíveis, sendo que a plenitude de todos estes requisitos se devem em grande parte à presença do quebra-mar exterior constituinte deste porto. Este elemento

de proteção oferece boas condições de acessibilidade, de segurança e de abrigo para o atracamento de embarcações e também para a operacionalidade que se requer para uma infraestrutura deste padrão (Castro, 2018).

O quebra-mar norte deste porto (ver Figura 31) é uma estrutura de tipologia em taludes que tem uma extensão de aproximadamente 2 100 metros e uma cota de coroamento a +10,0 m (ZH). Os mantos de proteção de extradorso são resguardados por blocos de tetrápodes e os de intradorso por blocos de enrocamento. A transição entre estas duas camadas é feita através de duas faixas de filtros em enrocamento (LNEC, 2009).



Figura 31 – Ilustração aérea do porto de Viana do Castelo, onde se pode visualizar o quebra-mar de taludes a norte, com 2 100 metros de extensão e que alberga esta infraestrutura portuária (LNEC, 2009).

3.6.3. *Porto de Sines, Portugal*

O Porto de Sines é uma infraestrutura portuária contemporânea que dispõe de fundos naturais até -28 m (ZH). Possui, igualmente, terminais especializados que permitem o movimento de diferentes tipos de mercadorias.

Este porto é a infraestrutura marítima portuguesa mais semelhante com o Porto de Leixões, por se localizar no Oceano Atlântico e por estar sujeito a ações meteo-marítimas semelhantes às que o Porto de Leixões experiencia. Ambos estes portos estão providos de elementos de proteção costeira semelhantes.

No entanto, o Porto de Leixões e o Porto de Sines são infraestruturas que apresentam configurações estruturais diferentes. O Porto de Sines é o principal porto na fachada ibero-atlântica, devido às suas características geofísicas, e é também a principal porta de entrada de abastecimento energético de importantes matérias-primas em Portugal, nomeadamente gás natural, carvão, petróleo e seus derivados (Ferreira, 2009).

O Porto de Sines está atualmente resguardado por dois quebra-mares. O Molhe Oeste (ver Figura 32), finalizado em 1978, é composto por um quebra-mar de taludes, sendo o manto resistente composto por material de enrocamento. O Molhe Este (ver Figura 33) é constituído por um quebra-mar de taludes, sendo o manto resistente deste composto por blocos de betão do tipo Antifer. Ambas as estruturas servem para propiciar as devidas condições de proteção e de segurança que se requerem para um porto desta magnitude que, por sua vez, tem um alto nível de exigência em termos de operacionalidade (Santos, 2004).



Figura 32 – Ilustração do Molhe Oeste do Porto de Sines, de tipologia em taludes, localizado na área do terminal de carga geral (Teixeira, 2012).



Figura 33 – Ilustração do Molhe Este do Porto de Sines, de tipologia em taludes, localizado na área do terminal de contentores (Teixeira, 2012).

O Molhe Oeste é constituído por um manto exterior protegido por duas camadas de dolos de 42 t (em betão não-armado) dispostos num talude com uma inclinação de 3:2 (H:V). O perfil transversal do quebra-mar oeste do Porto de Sines está ilustrado na Figura 34.

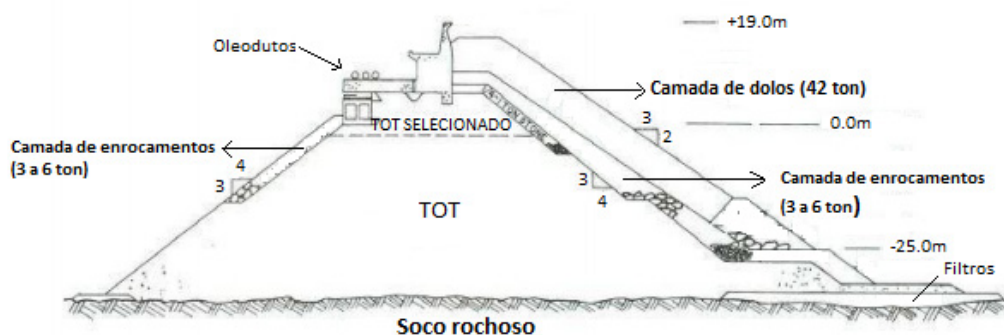


Figura 34 – Ilustração do perfil transversal do quebra-mar oeste (*Port Sines Investigating Panel, 1982*).

Após o término da empreitada de implementação do quebra-mar oeste do Porto de Sines vieram a suceder-se uma conjugação de temporais de grande magnitude, particularmente nos anos de 1978 e 1979. Estes temporais traduziram-se, preliminarmente, na perda de sensivelmente dois terços do manto de proteção e em danos expressivos em alguns trechos da superestrutura. Ulteriormente, com a ininterrupção das intempéries ocorrentes, acabou por ocorrer a desagregação de quase toda a secção do manto exterior e da superestrutura da estrutura de proteção costeira.

Ainda nesses mesmos anos vieram a ser encetados alguns trabalhos de restauração particularmente nos postos de acostagem 2 e 3, como ilustra a Figura 35, considerados como reparações prioritárias, sendo a sua reativação imprescindível para o modelo comercial e operacional do Porto de Sines.

Mais tarde, entre 1989 e 1992, veio a ser desenvolvido um conjunto de trabalhos complementares mais abrangentes, que contemplaram a requalificação e enraizamento do quebra-mar oeste, alguns melhoramentos nos acessos de emergência e, por fim, a construção e implementação de uma nova cabeça na estrutura de proteção (Reis et al., 2011).

Atualmente, o quebra-mar oeste tem uma extensão de 1,6 km e é escudado por blocos cúbicos Antifer de 400 kN no enraizamento, de 900 kN no perfil corrente do tronco da estrutura e entre 900 kN e 1 050 kN na cabeça do quebra-mar, por ser este o setor mais delicado do elemento costeiro.

Este quebra-mar continua a ser composto por três postos de acostagem mas, no entanto, só os postos 2 e 3 se mantêm operacionais, já que a secção original do Molhe Oeste, onde se localiza o posto de acostagem 1, nunca mais voltou a ser restaurada. Contudo, foram já desenvolvidos vários estudos de avaliação com vista a ser efetuada uma requalificação final do quebra-mar oeste destinada à reestruturação da estrutura original e à reativação do posto de acostagem 1. Esta mesma intervenção visaria o reforço das condições de abrigo e de funcionalidade desta infraestrutura portuária, porém a mesma ainda não veio a ser implementada (Reis et al., 2011).

Os setores requalificados e por requalificar do Molhe Oeste do Porto de Sines estão representados na Figura 35.

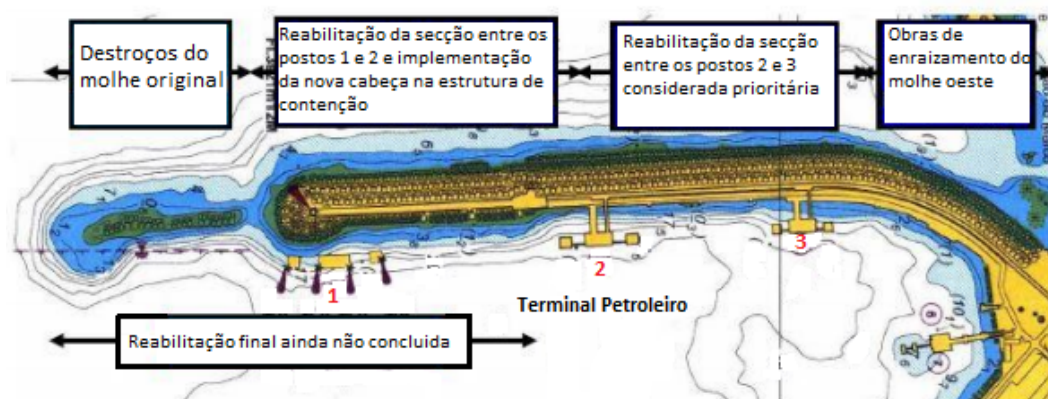


Figura 35 – Ilustração e identificação dos setores requalificados e por requalificar do Molhe Oeste do Porto de Sines (Reis et al., 2011).

O quebra-mar este do Porto de Sines é um elemento de proteção costeira constituído por dois troços, de tipologia de taludes, com um núcleo composto por TOT e mantos de proteção de extradorso e de intradorso compostos por blocos de betão (tipo Antifer).

A transição entre estas duas camadas é feita através de duas faixas de filtros em enrocamento. Ao longo de todo o coroamento do elemento existe uma superestrutura maciça em betão. A zona da cabeça, sendo a parte mais vulnerável da estrutura, foi protegida com blocos de betão mais pesados do que aqueles que se aplicaram no setor do tronco da estrutura, por se ter adotado a mesma inclinação de talude (Reis et al., 2011).

Está prevista vir a ser implementada uma extensão da atual estrutura de proteção Este, desenvolvida a partir deste quebra-mar e paralelamente à linha de costa em direção a Sul. Foram também já encetados vários estudos de avaliação para o projeto desta empreitada, tendo sido adotada uma solução estrutural idêntica à do quebra-mar este já existente em virtude do seu elevado rendimento operacional e funcional.

Em termos de extensão, a solução definida foi a de um prolongamento do elemento de proteção costeira em 1 100 metros. Os principais desígnios para a realização desta empreitada prendem-se maioritariamente com o objetivo de reforçar as condições de abrigo da bacia portuária do Porto de Sines e também com o intuito de reduzir o período de inoperacionalidade do terminal petrolero, de modo a incrementar o rendimento operacional de todas as atividades efetuadas no porto (APS, 2014).

3.6.4. Novo Porto da Corunha, Espanha

O novo porto exterior da Corunha, o Porto de *Punta Langosteira*, é uma infraestrutura portuária relativamente recente com uma enorme margem de progressão e de desenvolvimento no futuro, centrado maioritariamente no seu potencial de plataforma logística mundial.

O Porto de *Punta Langosteira*, ilustrado na Figura 36, fica estrategicamente localizado perto de um cabo oceânico na região da Galiza, no noroeste de Espanha, e é dotado de profundidades naturais consideráveis, sendo que a razão da sua implantação teve como objetivo a captação de novas tipologias de navios enquadrados no modelo de gestão futura que este porto pretende implementar e abranger.



Figura 36 – Ilustração do novo porto exterior de *Punta Langosteira* na Corunha, Espanha (Fonte: <http://www.spanishports.es/texto-diario/mostrar/971132/obras-cierre-perimetral-puerto-exterior-punta-langosteira-iniciaran-principios-2018>; consultado em agosto de 2020).

Esta infraestrutura marítima faz parte da composição do Porto da Corunha e começou a ser implementada em março de 2005 por razões de otimização do antigo porto que revelava graves limitações ao nível de acessibilidades. Este já não detinha de áreas de expansão admissíveis para o modelo de atividade que o Porto da Corunha vinha a desenvolver a nível de transporte de granéis, de receção de navios, de movimentação e armazenamento de navios de carga contentorizada e de carga geral. Todas estas atividades vinham já a apresentar um acentuado crescimento, incompatível com as condições que o antigo porto englobava (Freire et al., 2012).

Contudo, apesar de todos os benefícios que a posição geográfica deste novo porto oferece, desde logo ao nível de condições privilegiadas de apoio à sua implementação e de áreas para obtenção dos materiais necessários à consecução da obra em causa de forma acessível, bem como ao nível da localização estratégica em termos de acessibilidades por via rodoviária e ferroviária, também

havia, no entanto, algumas desvantagens intrínsecas a todo este cenário de enquadramento e implantação. Estes inconvenientes perder-se-iam maioritariamente com o facto desta estrutura se situar demasiado próxima de zonas de atividade industrial que poderão vir a necessitar do mesmo modo de espaço para futuras ampliações, entrando, pois, em conflito com o desenvolvimento futuro do novo porto (Freire et al., 2012).

Mesmo assim, o novo Porto da Corunha já teria à sua disposição pelo menos 143,5 ha de terraplenos para implementação de instalações costeiras de qualquer natureza.

O Porto de *Punta Langosteira* ficou também divulgado pelo tipo de estruturas de proteção que foram implementadas para resguardar a infraestrutura portuária da agitação marítima e para prover este porto de condições de acessibilidade adequadas para a receção de um vasto leque de tipologias de embarcação, bem como para que estes possam aportar naquelas instalações portuárias (Freire et al., 2012).

Após a implementação de um conjunto de avaliações ficou deliberado, em fase de projeto, um parecer assente na consecução de um quebra-mar de estrutura mista com 3 354 m de comprimento, como se pode observar na Figura 37. O manto resistente deste seria composto por material de enrocamento TOT. A nova infraestrutura apresentaria também um quebra-mar vertical (contradique) com 391 m de comprimento, transversal ao quebra-mar principal, um cais transversal com um calado de 22 m e uma extensão de 921,5 m, assim como um molhe secundário com 579 m, também de enrocamento.



Figura 37 – Ilustração do quebra-mar norte, de tipologia mista, do Porto de *Punta Langosteira*, onde se pode observar a constituição do manto resistente deste, composto por blocos de betão cúbicos (Delft Hydraulics, 2004).

Atualmente, com a implementação de todas estas empreitadas, o Porto de *Punta Langosteira* dispõe de 230,5 ha de águas abrigadas.

A execução da empreitada inicializou-se com a realização dos normais trabalhos padronizados neste tipo de construções, designadamente pela construção de todos os acessos à obra, pelos

trabalhos em pedreiras e nas centrais de betão, bem como a produção de blocos de betão. O prazo para a consecução de todas estas operações foi de dois anos.

Para a instituição desta infraestrutura foi preciso construir um quebra-mar de taludes provisório com 503 m de extensão e um manto resistente formado por blocos de 50 t.

A execução desta infraestrutura efetuou-se por via da utilização de equipamento marítimo, sendo o material do núcleo da estrutura despejado por dois batelões antes de ser protegido com blocos de enrocamento de 1 t e posteriormente por blocos de betão de 15 t. Ulteriormente procedeu-se à execução do manto resistente por meio da colocação e distribuição de duas camadas de blocos de betão de 150 t.

O quebra-mar norte foi executado à cota de +25 m (ZH) ao longo do trecho principal. A secção transversal deste elemento encontra-se esquematizada no Anexo III. A cabeça do quebra-mar, com cerca 144 m de comprimento, é composta por cinco caixotões, fundados à cota -29 m (ZH). Este quebra-mar tem uma profundidade de água de 40 m (ZH) (Delft Hydraulics, 2004).

Durante o inverno procedeu-se à suspensão das obras de avanço da estrutura de proteção, como é habitual neste tipo de obras. Contudo, durante esse período, seriam efetuadas outras operações com vista a implementação do núcleo da estrutura. Além disso foi também concebido um elemento de proteção para resguardo e preservação da cabeça do quebra-mar (Gutiérrez-Serret et al., 2009). A integração do conjunto de todas estas empreitadas de proteção costeira foi das obras que maior expectativa desencadeou, particularmente quanto à sua futura resposta no que concerne todo o tipo de eventos de natureza pelágica possíveis de ocorrer, já que a infraestrutura portuária de *Punta Langosteira* fica inserida numa das zonas com maior exposição a fenómenos de agitação adversos de índole marítima do mundo (Freire et al, 2012).

3.6.5. Porto de Gijón, Espanha

O Porto de Gijón (ver Figura 38), situado na região noroeste das Astúrias, mais propriamente na Baía de Biscaia, é uma infraestrutura portuária respeitável em Espanha, com uma enorme margem de progressão e de desenvolvimento no futuro.

Este porto é uma das principais estruturas marítimas do Arco Atlântico e é a infraestrutura marítima líder em termos do modelo de atividade de transporte de granéis no país vizinho.

Em fevereiro de 2005 o Porto de Gijón seria alvo de um projeto reforma profundo devido à forte conveniência em amplificar todo o seu perímetro portuário por múltiplas razões inerentes ao seu crescimento comercial. Algumas das principais condicionantes correlacionadas com esta empreitada prenderam-se em particular com os seguintes fatores:

- Previsão de ondas de grande magnitude durante o decorrer das obras em que chegaram a atingir os 7 metros;

- Problemáticas de índole ambiental;
- Estabelecimento de um quebra-mar de tipologia misto e criação de 140 ha de terraplenos para a implementação de um terminal de granéis sólidos.



Figura 38 – Imagem aérea do Porto de Gijón após o término das obras de ampliação executadas no interior da sua área jurisdicional (Contratas, 2018).

Após a conclusão das obras de requalificação do Porto de Gijón com uma extensão de 3,8 km, estas apresentariam a seguinte configuração constituída por três diferentes modelos de proteção costeira:

- Quebra-mar Torres (1 488 metros de extensão; ilustrado no Anexo IV). É um quebra-mar de tipologia mista em enrocamento, com uma profundidade de implantação ente 10 a 22 metros (ZH) e com o manto resistente constituído por duas camadas de blocos de betão cúbicos com peso entre 10 e 145 t. As principais condicionantes associadas a esta empreitada seriam as condições da agitação marítima, que foram de uma enorme severidade como é habitual para esta região do Atlântico. Por isso, entre os finais da estação de outono e toda a estação de inverno, as obras de ampliação portuária seriam suspensas. Além disso também vieram a ocorrer outro tipo de constrangimentos durante a execução dos trabalhos, maioritariamente interligados com a profundidade dos fundos aquáticos da área portuária, com a grande quantidade de material rochoso empregue e, por fim, os consequentes condicionamentos logísticos associados ao trânsito intenso de mais de 2 000 camiões por dia (Gutiérrez-Serret et al., 2009);
- Quebra-mar norte vertical (1 593 metros de extensão; ilustrado no Anexo IV). É um quebra-mar de tipologia vertical, com uma profundidade de implantação ente 25 a 30 metros (ZH), constituído por 33 caixotões com fundações à cota -24,75 metros (ZH). A escolha desta tipologia deveu-se ao facto de, nesta extensão em particular, a profundidade dos fundos ser acentuada, sendo que os quebra-mares verticais para este tipo de condições são mais

vantajosos no aspeto económico, pois requerem a utilização de uma menor quantidade de material, nomeadamente de material rochoso, sendo que a sua execução também é mais rápida. Esta situação já tinha sido exposta aquando da definição deste tipo de estruturas. Esta empreitada iniciou-se com o desenvolvimento de trabalhos de dragagem dos fundos em areia até ser atingido o soco rochoso, para que o prisma de fundação em enrocamento para os caixotões fosse realizado, e estes fossem fundados na área que se pretendia (Gutiérrez-Serret et al., 2009);

- Quebra-mar secundário (815 metros de extensão). É um quebra-mar de tipologia em taludes de enrocamento, com uma profundidade de implantação de aproximadamente 30 metros (ZH) e alinhado transversalmente ao quebra-mar norte, possibilitando um maior resguardo de toda a bacia portuária. A escolha desta tipologia para esta extensão em particular deveu-se ao facto de os quebra-mares em taludes serem estruturas muito competentes e que dão uma boa resposta a fenómenos de reflexão marítima que tendem a ser mais prejudiciais na zona de entrada de uma bacia portuária, maioritariamente para os navios que estejam a entrar ou a sair de um porto.

A metodologia operativa relacionada com a implementação de todas as estruturas mencionadas anteriormente foi estruturada e coordenada tendo por base um sistema de previsão de ondas (SAPO), desenvolvido especificamente para este tipo de empreitadas marítimas. Este sistema de previsão providencia uma estimativa relativa aos seguintes dados: altura de onda significativa, período de pico e velocidade do vento (Gutiérrez-Serret et al., 2009).

No Quadro 9 são demonstrados alguns dados técnicos relativos à obra realizada no Porto de Gijón.

Quadro 9 – Referências da obra executada no Porto de Gijón (adaptado de www.puertogijon.es/, consultado em agosto de 2020).

Betão: 2.402.931m ³	Aterros: 27.437.761m ³
Blocos cúbicos (121.671 unidades): 1.220.597m ³	Hidráulicos: 18.959.898m ³
Caixotões (81 unidades): 483.520m ³	Terrestres: 8.477.863m ³
Muro-cortina: 668.486m ³	Pedraplenos: 11.839.763 m ³
Superestrutura: 30.328m ³	Quebra-mar: 1.542.222m ³
	Dragagem de rocha: 182.990m ³

Blocos cúbicos de betão
Blocos de 3,5 t: 5061 unidades
Blocos de 10 t: 85452 unidades
Blocos de 30 t: 9693 unidades
Blocos de 45 t: 10958 unidades
Blocos de 90 t: 6447 unidades
Blocos de 145 t: 2870 unidades
Blocos de 200 t: 788 unidades
Blocos de guarda (145 t): 402 unidades

Capítulo IV

Caso de Estudo: Extensão do Quebra-mar Exterior do Porto de Leixões

(página propositadamente em branco)

4. Caso de Estudo: Extensão do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões

4.1. História e Importância do Porto de Leixões

«Não se doma facilmente o oceano, não se modifica, sem ter que vencer grandes dificuldades, a obra espontânea da natureza. Mas a ciência, a engenharia hidráulica, confiada nos seus poderosos recursos, ia encetar a luta com o oceano, e estava certa de vencê-lo, não sem violentas refregas e frequentes conflitos com tão valoroso adversário. Por sua parte, o mar revirava o dente à hidráulica, procurava reaver o terreno que a ciência lhe conquistava, e, apesar de ficar vencido na luta, ainda não está resignado com a derrota, ainda de vez em quando, como aconteceu o ano passado, se arremessa em fúria contra o Porto de Leixões para desfazê-lo»

– Alberto Pimentel, O Porto de Leixões ..., 1893

A região de Leixões deve a sua denominação à existência de inúmeras formações geológicas verticais e íngremes formadas por eventos geomorfológicos naturais com o mesmo nome que afloram neste local. Leixões tem uma vasta história e dispõe igualmente, já desde tempos ancestrais, de um amplo potencial como local de refúgio e abrigo para receção e acolhimento de embarcações, como se conseguiu comprovar pela descoberta de vários utensílios e outros achados arqueológicos interligados a este âmbito e datados de tempos remotos. Perto dessa área de abrigo começou por se fixar numa elevação da margem esquerda um pequeno povoado da Idade do Ferro, certamente impulsionado pelo privilégio de se fixar numa zona próxima do mar, já que estas zonas são normalmente áreas férteis e propícias para atividades básicas como agricultura ou pesca. Além desta conjuntura, também se conseguiu comprovar pelas escavações que já nessa época coexistia uma estrutura portuária muito rudimentar, possivelmente implementada por essa mesma povoação (Cleto, 1998).

Tendo surgido primitivamente como um local com excelentes condições de albergue natural de embarcações, já no final do século XIX a região de Leixões transformar-se-ia no plano onde iria ser fixada uma das maiores estruturas portuárias, não só ao nível da península ibérica como também de assinalável relevância a nível europeu. Algumas das razões que propiciariam a ocorrência deste cenário seriam inevitavelmente a sua vantajosa localização em termos geomarítimos para com o oceano Atlântico e, igualmente, as excecionais condições naturais que a foz do rio Leça sempre ofereceu (Cleto, 1998).

Na Figura 39 encontra-se representada uma planta geográfica da barra da cidade do Porto, datada de 1789.



Figura 39 – Planta geográfica da barra da cidade do Porto (segundo Maldonado, 1789: in Cleto, 1998).

Devido a esta situação, entre outras, tudo indicava que era imprescindível que se abdicasse do Porto do Douro para se avançar com a construção de um porto artificial em Leça no início do século XIX. Contudo, muitos problemas viriam a surgir, sendo que muitos deles se deviam essencialmente ao contexto socioeconómico, ao conforto e à ambientação sentida com a localização do porto na barra junto às margens do Douro durante séculos a fio. No entanto, foi já com o aproximar do final do século XIX, e após muitas décadas de tensão, avanços e recuos que foi nomeado o engenheiro Nogueira Soares para levar a cargo a empreitada baseada no projeto final (já modificado) no dia 24 de Agosto de 1883. Por isso, cerca de um ano após ter sido adjudicada a empreitada portuária de Leixões, são assim iniciadas as obras de implementação do mesmo a 13 de julho de 1884. No projeto estava abrangida a constituição de dois molhes, um a norte com cerca de 1 579 metros e outro a sul com 1 147 metros, enraizados nas praias adjacentes à foz do Rio Leça, de forma a implementar dois elementos fundamentais de abrigo artificial à estrutura portuária, com uma profundidade entre os 7 e os 16 metros. Além desses dois extensos paredões, estava abrangida da mesma forma, a implementação de um quebra-mar elevado em cerca de um metro acima do zero hidrográfico, de modo a se conseguir ter uma extensão extra de algumas centenas de metros em relação ao molhe localizado a norte. Na extremidade desse esporão iria ser implementado um farolim de sinalização deste elemento (Cleto, 1998).

A planta geral e perfis-tipo de diversos projetos elaborados na época por vários engenheiros nacionais e internacionais estão representados na Figura 40.



Figura 40 – Porto de Leixões: planta geral e perfis-tipo segundo os diversos projetos que foram elaborados por diferentes Engenheiros nacionais e estrangeiros. S/d. Arquivo da APDL (adaptado de Cleto, 1998).

Para a construção dos dois molhes foi utilizado granito extraído de pedreiras próximas, principalmente da pedra de São Gens (Custóias), a partir da qual foi implementada uma interligação até Leixões através de uma linha de caminho-de-ferro, construída expressamente para este fim, com cerca de sete quilómetros de extensão. Assim que o material rochoso chegava aos estaleiros e oficinas montados em Matosinhos e em Leça da Palmeira, este era então trabalhado e conglomerado de forma a se criarem enormes blocos de granito para serem utilizados na implementação das estruturas costeiras, que muitas vezes chegavam a atingir um peso de 50 toneladas (Cleto, 1998).

Tendo sido considerada a empreitada mais importante de engenharia executada em Portugal durante o século XIX, estima-se que tenham atracado no porto artificial, desde o início da mesma em julho de 1884, cerca de 2 308 navios. Terão sido transportados cerca de 30 275 passageiros desde o início dos trabalhos até a conclusão da empreitada em fevereiro de 1895, o que auguraria enormes expectativas relativamente ao futuro desta infraestrutura portuária (Cleto, 1998; Sousa & Alves, 2002).

Sendo assim, logo após o término dos trabalhos de empreitada do Porto de Leixões verificou-se um crescimento bastante significativo de entrada de navios. Em 1913 é outorgada uma lei que pré-estabelece a conversão do porto de abrigo de Leixões em porto comercial e é igualmente criado um organismo que passaria a administrar e a gerir a construção e exploração desta estrutura marítima: a Junta Autónoma das Obras Marítimas do Porto do Douro Leixões que seria precedente da atual administração da APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo. Posteriormente, em 1915, são iniciadas algumas obras de reconfiguração e requalificação dentro

desta nova conjuntura, nomeadamente as obras de ajustamento do Molhe Sul com a implementação de um cais acostável com cerca de 400 metros de comprimento. Este cais permitiria que esta estrutura tivesse a dupla função de abrigo e de receção e atracamento de navios com um calado máximo até cerca de 7 metros. No entanto, em virtude de nessa mesma data estar a decorrer a 1ª Guerra Mundial, bem como em consequência desta, principalmente no que concerne à falta de recursos financeiros, esta obra só ficaria concluída em 1931 (adaptado de Cleto, 1998).

Contudo, o Porto do Douro ainda manteve uma atividade significativa até meados dos anos 30 do século XX, sendo que, sensivelmente a partir do início dessa década, a navegabilidade nesta infraestrutura começou a ficar cada vez mais circunscrita, não só devido à evolução naval que se traduziu num enorme aumento das dimensões da grande maioria dos elementos náuticos de tipologia comercial, como também devido à construção de barragens de aproveitamento hidroelétrico do rio Douro.

Posto isto, e tendo em conta todas as circunstâncias que vieram a suceder com o decorrer do século XX, em 1976 o rio Douro já só representava cerca de 2% do tráfego portuário entre os portos do Douro-Leixões (Cleto, 1998).

Em 1932, após das modificações e ajustamentos implementados no cais acostável junto ao Molhe Norte, são iniciadas as obras de construção da doca nº 1, bem como é dado aval para se proceder à construção de um extenso quebra-mar durante o mesmo período. A doca nº 1 só ficaria concluída em 1940, dotada de um comprimento de 550 metros e uma largura de 175 metros com dois cais acostáveis num total de 1 000 metros. A Figura 41 ilustra a doca nº 1 do Porto de Leixões em meados dos anos 40. A partir desta data, e com a consecução desta obra, começou-se a perceber a grande efetividade em termos de potencial competitivo concernente com este porto, nomeadamente no ano seguinte (1941) com a movimentação de aproximadamente 340 mil toneladas de mercadorias nesta mesma doca. Posteriormente, já no ano de 1949, a movimentação de carga seria de 700 mil toneladas movimentadas e em 1959 seria ainda maior com a movimentação de 900 mil toneladas de carga a partir deste complexo (Cleto, 1998).



Figura 41 – Ilustração da doca nº 1 no Porto de Leixões em meados dos anos 40 do século XX (adaptado de Rodrigues, in: <http://flickr.com>).

Em 1956 procedeu-se à construção da doca nº 2, preenchendo uma área de aproximadamente 500 000 m², que contemplou igualmente o enraizamento de um cais acostável com um comprimento de aproximadamente 1 400 metros, sendo que esta obra só seria totalmente concluída em meados da década de 1970 (Cleto, 1998).

Os locais de implantação das docas nº 1 e nº 2 são representados pelos mapas da Figura 42.

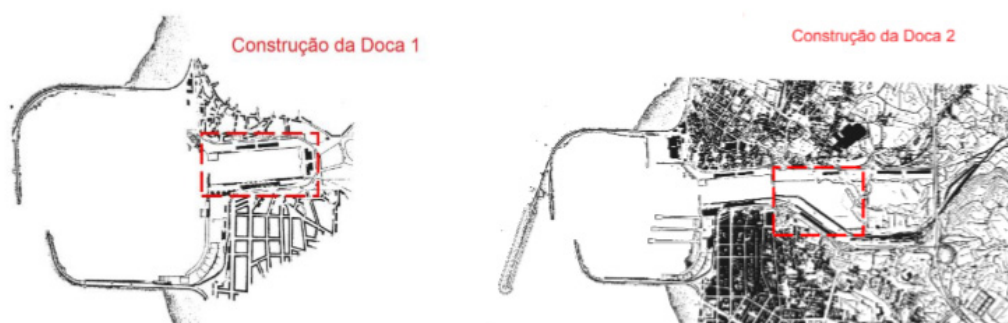


Figura 42 – Mapa em planta onde se pode observar precisamente o local onde foi implantada a doca nº 1 e a doca nº 2, respetivamente (adaptado de APDL, 2015).

Entre 1974 e 1979 é construído o Terminal de Contentores, que incluiu a implementação da doca nº 3, e que só estaria totalmente concluído em meados da década de 1990. Entre 1973 e 1984 foi também construída a doca nº 4 na margem norte deste porto, com um comprimento de 503 m (Cleto, 1998).

O troço extremo do quebra-mar foi aquele que acarretou maiores problemas, sendo que, nos anos de 1973, 1974 e 1979, o mesmo ficou praticamente irreconhecível e vulnerabilizado devido aos estragos provocados pelas más condições meteo-marítimas, especialmente na zona do seu talude de tetrápodes e na superestrutura de betão. Concomitantemente, no final de 1980, e depois de já ter sido alvo de algumas obras de requalificação, esta estrutura foi ampliada (Cleto, 1998).

Na Figura 43 pode-se visualizar a evolução da área portuária comercial de Leixões entre as décadas de 1930 e 1990.



Figura 43 – Desenvolvimento da área portuária comercial de Leixões entre as décadas de 1930 e 1990 (adaptado de Freitas, 2009).

Com a transição para o novo século (XXI), e tendo em conta a ininterrupta evolução do comércio marítimo mundial, com destaque para o contínuo aumento das dimensões dos navios associado ao custo de transporte de mercadorias, foi apresentado um plano de desenvolvimento estratégico para o Porto de Leixões por determinação da APDL. Tendo em vista a readaptação, reabilitação e renovação da sua área portuária, este plano foi posteriormente aprovado em 2004, formalizando assim, em termos práticos, toda uma estratégia de desenvolvimento essencial para esta infraestrutura até ao horizonte temporal de 2015. Este plano consistia numa análise muito abrangente e minuciosa de todos os aspetos que iriam condicionar futuramente o desenvolvimento deste porto, tanto a nível interno como externo, bem como abarcava uma avaliação precisa no âmbito de potenciais macrotendências que estavam cada vez mais a consolidar-se no modelo de exploração portuário moderno.

Conclui-se que três aspetos em particular seriam fundamentais para a futura consolidação evolutiva e bem-sucedida do Porto de Leixões. Estes seriam, mais precisamente, a intensificação do processo de globalização do transporte marítimo, a reformulação e estruturação da base económica e logística do seu *hinterland* e, também, a coordenação de ações que permitam conciliar o novo papel das infraestruturas portuárias no sistema de transporte e logística.

A primeira medida tinha como pretensão a ideia de tornar o Porto de Leixões numa infraestrutura mais competitiva, principalmente através da cooperação e de um maior reforço das relações comerciais deste porto com mercados importantes, particularmente o asiático, o sul-americano e o africano. A segunda medida tinha como grande objetivo a inclusão desta infraestrutura no sistema logístico regional através da implementação de ações de reforço das ligações portuárias

com outros meios de transporte terrestres. Já a terceira medida destinava-se a desenvolver e a melhorar a integração do Porto de Leixões na cadeia de transporte e de logística (APDL, 2006).

Sendo assim, foi criado um documento sustentado em 21 ações de base com vista a melhorar a eficiência e a operacionalidade portuária através de influxos de reforço e aumento da capacidade e competitividade portuária e da evolução da economia regional.

Em 2005, após obras de desmonte aquático, foi fixada à cota -12 m (ZHL) a área referente à Bacia de Rotação e o Canal de Acesso à Doca nº 4. No ano seguinte testemunhou-se um grande crescimento da carga transportada e contentorizada que se prolongou pelos anos seguintes, à exceção dos anos da crise financeira de 2008 e 2009, em muito devido à implementação das ações que constavam no PEDPL (Plano Estratégico de Desenvolvimento do Porto de Leixões).

Entre 2007 e 2008 foi construído o Terminal Multiusos resultante da requalificação integral implementada no cais acostável no Molhe Sul, sendo que os fundos aquáticos nessa zona foram acrescidos, passando da cota -7,0 m (ZHL) para a cota -8,5m (ZHL).

A Plataforma Logística do Porto de Leixões, representada na Figura 44, é inaugurada em julho de 2015, sendo constituída e dividida por dois grandes polos logísticos. O polo 1 é composto por armazéns logísticos com a função de privilegiar todo o tipo de operações portuárias de segunda linha, como a armazenagem e a organização de cargas. O polo 2 é formado por outros tantos armazéns logísticos modulares, e também por um terminal ferroviário intermodal da responsabilidade da REFER – Infraestruturas de Portugal.



Figura 44 – Ilustração das áreas integrantes da Plataforma Logística de Leixões com a localização de alguns dos centros logísticos explorados por algumas empresas e o perímetro de acessibilidades disponível para a transladação ou receção de carga comercial. (Fonte: <https://www.transportesenegocios.pt/leixoes-inaugura-plataforma-logistica-dia-29/>, consultado em abril de 2020).

Em julho de 2015 é também inaugurado o Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, sendo este um dos projetos mais relevantes e elementares, tanto para o crescimento desta infraestrutura portuária como para o fomento da economia da região norte. Esta obra está identificada como uma das estruturas mais prioritárias no que concerne ao Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas de Portugal. Através desta empreitada, o Porto de Leixões ficaria assim provido de todas as condições para a receção e acolhimento da maior parte de elementos náuticos que integram toda a frota global de navios cruzeiros.

O Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões é atualmente um terminal de tipologia *turnaround*, ou seja, um navio de cruzeiro pode iniciar e terminar uma rota completa a partir deste porto. Em 2016 este terminal recebeu 84 navios de cruzeiros e mais de 71 000 passageiros, sendo esperado um crescimento muito significativo nos próximos anos quanto a este modelo de atividade empresarial (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Na Figura 45 pode-se observar o maior navio de cruzeiros atracado pelo Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões.



Figura 45 – Imagem do Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, onde se pode observar atracado o maior navio de cruzeiros de sempre que este porto acolheu até à data, em Setembro de 2018 (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Posteriormente, em outubro de 2016, dentro do âmbito de continuidade na promoção e desenvolvimento do Porto de Leixões, a APDL decidiu nomear o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para desenvolver um conjunto de estudos de investigação. Pretendia-se que estes estudos servissem de base para a elaboração dos projetos de melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões, bem como para a elaboração do projeto de prolongação do quebra-mar exterior, sendo esta última intervenção uma das bases de fundamentação e de estudo desta dissertação.

Os trabalhos desenvolvidos pelo LNEC tiveram como objetivo a perceção de dois pontos-chave interligados entre si: a exequibilidade destas duas obras e a determinação da melhor solução de

execução das mesmas tendo em conta todos os fatores inerentes a estes tipos de empreitadas. Particularmente, estes estudos tinham o intuito dotar este porto de condições e requisitos para que este consiga dar uma boa resposta ao aumento da dimensão média dos navios que transpõem o mesmo, e que registaram um crescimento de 77% entre 2006 e 2018 (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Na Figura 46 pode-se observar a evolução esquematizada do Porto de Leixões, desde a sua constituição até à atualidade. A última representação é uma fotografia aérea ilustrativa do Porto de Leixões em 2018, ainda antecedente às obras de melhoria das acessibilidades marítimas deste porto e à implementação da empreitada de prolongamento do quebra-mar exterior.

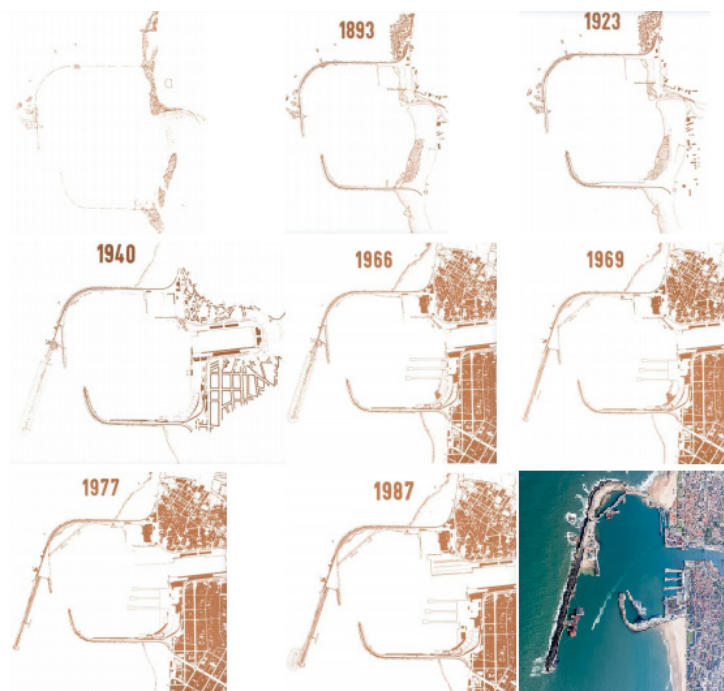


Figura 46 – Evolução esquematizada da área portuária de Leixões desde a sua constituição até à atualidade (adaptado de Cleto, 1998).

Em suma, a melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões e a empreitada de extensão do quebra-mar exterior irão assegurar um forte incremento das condições de segurança e de navegabilidade nos acessos principais ao Porto de Leixões, na zona de manobra de navios e no Anteporto, permitindo assim uma melhor acessibilidade e uma movimentação mais segura e facilitada das embarcações que venham a aportar nesta infraestrutura.

A Figura 47 representa a implementação do projeto de melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões.

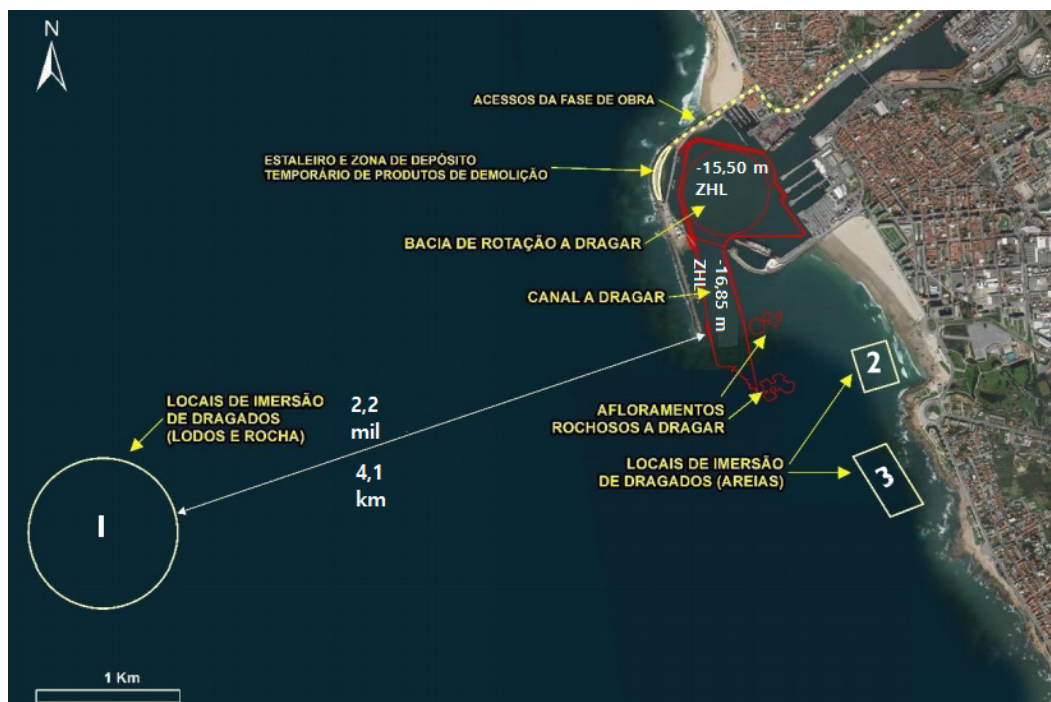


Figura 47 – Implementação geral do projeto de melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões (adaptado de Consulmar/Nemus, 2018).

Após aprovação por parte da APA, são por fim lançados os concursos por parte da APDL, em fevereiro de 2019, para se proceder à melhoria das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Este projeto consiste no aprofundamento do canal de entrada de -15,00 metros/-12,00 metros de fundos para a cota geral de -16,85 metros de fundos e da bacia de rotação do Porto de Leixões de -12,00 metros de fundos para os -15,50 metros de fundos (cotas relativas ao ZHL). Numa fase posterior planeia-se em proceder à ampliação do quebra-mar exterior em 300 metros com uma rotação de 20° do seu novo eixo em relação ao eixo da atual estrutura de proteção, como ilustrado na Figura 48 (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).



Figura 48 – Ilustração aérea da infraestrutura portuária de Leixões (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

O Porto de Leixões é considerado atualmente como o segundo maior porto em termos de movimentação de carga geral e em movimentação de granéis líquidos dentro do país. Apenas o Porto de Sines supera o Porto de Leixões no âmbito destas duas categorias. Quanto à movimentação de granéis sólidos, o Porto de Leixões encontra-se atualmente na quarta posição em termos da prestação deste tipo de serviços sendo superado pelos portos de Sines, de Lisboa e de Setúbal, respetivamente.

Atualmente, a área portuária de Leixões é albergada por dois molhes; o Molhe Norte com 1 800 m de comprimento e o Molhe Sul com 950 m. Esta é composta igualmente por dois cais, um de carga geral e outro de granéis sólidos, bem como por um cais de movimentação de granéis líquidos.

São cinco os terminais que constituem o Porto de Leixões, nomeadamente o Terminal de Petroleiros, o Terminal de Contentores, o Terminal Ro-Ro, o Terminal Multiusos e o Terminal de Cruzeiros. Este porto encontra-se dotado inclusive por uma doca de recreio e por um Porto de Pesca.

A Figura 49 ilustra o mapa atual do Porto de Leixões e todo o circuito de acessibilidades envolvente.

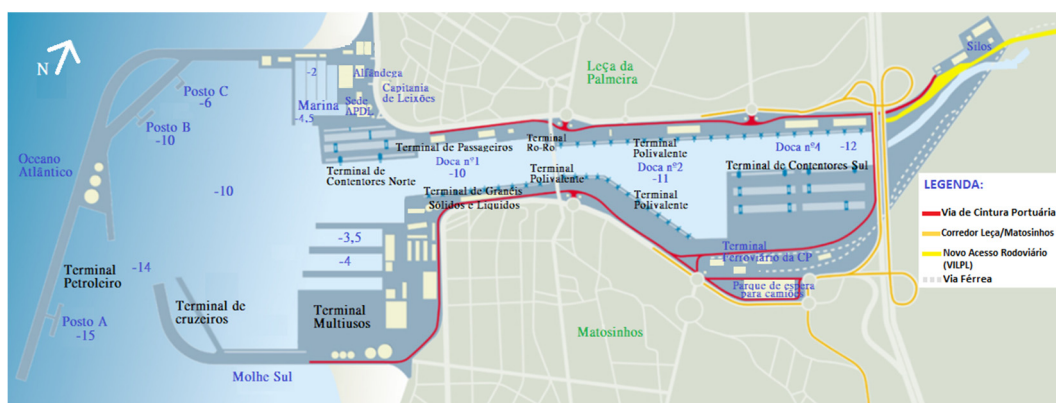


Figura 49 – Ilustração do mapa atual do Porto de Leixões com a agregação de todas as infraestruturas relevantes que fazem parte do seu modelo operacional e comercial, bem como o circuito de acessibilidades fundamental envolvente a esta infraestrutura portuária (adaptado de <https://www.apdl.pt/mapa-do-porto>, consultado em abril de 2020).

Num futuro próximo a APDL tem como desígnio levar a cabo um conjunto de ações de forma a ampliar a capacidade de movimentação de carga contentorizada, de modo a que esta infraestrutura portuária esteja preparada, dentro deste contexto, para dar uma resposta eficaz a todos os desafios cada vez mais evidentes interligados com a forte e exponencial globalização naval que tem vindo a ocorrer atualmente (adaptado de Consulmar/Nemus, 2018).

4.2. Modernização das Estruturas Portuárias

Com a progressão e evolução dos tempos os portos foram-se adaptando à reconversão e aprimoramento do perfil das frotas mundiais de navios, bem como às conseqüentes implicações daí decorrentes. O maior foco foi dado ao quadro decorrente da notória evolução dos navios de

carga em que a sua tipologia varia com o tipo de carga (i.e. porta-contentores, graneleiros, cruzeiros e Ro-Ro), e por serem igualmente estes os tipos de elementos náuticos que mais operam a nível mundial. Por essa mesma razão acaba por ser o modelo naval que mais influência e relevância tem no modelo estratégico, na gestão operacional e no desenvolvimento de negócio de qualquer porto. Os portos são classificados universalmente de duas formas. Primeiramente quanto à sua natureza, em que podem ser qualificados como naturais, seminaturais e artificiais (como é o caso do Porto de Leixões), e também quanto à sua utilização, em que podem ser qualificados como portos de índole militar, de lazer (portos de passageiros) ou comerciais, entre outros (adaptado de Portogente, 2019).

A seguinte Figura 50 demonstra fotografias aéreas do Porto de Sines e do Porto de Leixões; os dois portos comerciais mais importantes em Portugal.



Figura 50 – Imagem aérea do Porto de Sines à esquerda e do Porto de Leixões à direita (Fontes: Logística & Transportes Hoje, 2018; Bento, 2018).

Esta situação envolve que qualquer porto necessite de se modernizar e de realizar inúmeros investimentos ao longo do tempo de forma a melhorar e a aperfeiçoar todas as suas infraestruturas na perspetiva de incentivar e otimizar a sua operacionalidade.

As condicionantes que estão associadas ao desenvolvimento de uma área portuária em termos de extensão (maioritariamente para o plano de água por limitações naturais decorrentes do acréscimo em termos de densidade de construção urbanística na sua envolvente, como se pôde observar no caso específico do Porto de Leixões) devem ser avaliadas.

A expansão para *foreland* baseia-se convencionalmente em várias possibilidades correlacionadas com a execução de várias opções construtivas, como por exemplo a execução de empreitadas para criação de terraplenos com o intuito de conquistar área ao mar, devido a limitações construtivas em terra ou pela recorrente opção de construir ou prolongar estruturas de proteção costeiras, como é o caso dos quebra-mares.

Com o decorrer do tempo, muitas estruturas portuárias apresentam-se cada vez mais com evidentes limitações em termos de exigências por não possuírem de grande parte dos requisitos essenciais e imprescindíveis para poderem ser competitivas. Destaca-se o nível da profundidade adequada em áreas de operação portuária marítima e as habituais e evidentes limitações em

termos de comprimento de cais de acostagem e molhes, tendo em conta as contingências das condições meteo-marítimas atuais que, em certos períodos sazonais, são altamente severas.

Desta forma, a existência ou o provimento deste tipo de condições e de requisitos fundamentais tem uma influência significativa no âmbito da segurança que se requer para uma infraestrutura portuária nos dias de hoje. Ademais, permitem que estas consigam dar uma resposta adequada a todo o ornato inerente à evolução e ao crescimento de todo o tipo de elementos náuticos em associação com o aumento do volume de mercadorias transportadas atualmente.

Contudo, e apesar de todas estas evidências, no ano de 2009 a União Europeia constatou que o volume de mercadorias transportadas por via marítima correspondia já a 80% de toda a mercadoria movimentada a nível global devido ao aumento da globalização náutica, bem como à previsibilidade do aumento percentual da mesma nos anos seguintes. No entanto, precisamente nesse mesmo ano, acabou por eclodir o pico da crise económica, o que levou à comutação da linha de pensamento em termos de modelo de produtividade de milhares de empresas e corporações. Este contexto implicaria o aumento da dimensão dos elementos náuticos e, conseqüentemente, ao ajuste das infraestruturas portuárias face à inevitável evolução destes meios de transporte. Entra-se desta forma noutro campo também fundamental do ponto de vista competitivo de qualquer porto marítimo: o processamento logístico (adaptado de Comissão Europeia, 2016).

Em suma, todas as melhorias com vista à modernização de uma estrutura portuária relevante, em termos das suas condições de competitividade e capacidade, poderão consolidar ainda mais a sua posição e vincar esse mesmo impacto na sociedade e na economia local e global (Dias, 2009).

4.2.1. Ocupação de Novas Áreas no Espaço Marítimo

As autoridades portuárias têm normalmente a necessidade de implementar medidas com vista a renovação de áreas, instalações e equipamentos dentro do plano portuário, e de proceder a uma gestão ponderada dos acessos marítimos e terrestres integrados nessa mesma infraestrutura. Esta gestão tem em vista todos os requisitos atuais existentes, por exemplo a limitação de tempos de espera na atracação de elementos náuticos, conseguindo-se assim otimizar o tempo de permanência dos mesmos dentro de um porto.

Por isso, os objetivos principais que se requerem para um porto têm a ver particularmente com o propósito de potenciamento logístico, em termos de eficiência, produtividade e segurança, de modo a que estas mesmas infraestruturas consigam captar novas rotas viáveis. Tendo em conta tudo o que já se referiu em tópicos anteriores, existem várias opções com vista à forte necessidade para o aumento da capacidade e competitividade a que todos os portos dentro de um contexto de relevância internacional estão forçosamente sujeitos, essencialmente para que estes venham a dispor de condições adequadas à receção de navios de maior calado. A ampliação de um porto é

uma das opções mais pertinentes para responder a estas exigências mas, no entanto, esta opção estará sempre condicionada por diversos aspetos que poderão vir a dificultar algumas das soluções consideradas; enumeram-se: a profundidade disponível, as condições de agitação marítima existentes, os fundos dos canais, o caudal sólido transportado pelos rios que desaguam na estrutura portuária ou se o porto se trata de uma infraestrutura artificial ou se localiza, por exemplo, num estuário. Além disso, muitas infraestruturas portuárias estão igualmente cercadas por zonas urbanas, não existindo por isso a hipótese para expandir essas estruturas numa direção terrestre. Sendo assim, e tal como é o caso do Porto de Leixões, a única opção que as autoridades portuárias têm é a de promover, através de outras alternativas construtivas, a expansão do seu perímetro portuário para o plano de água, de forma a contornar todas estas limitações anteriormente referidas, nomeadamente com recurso à implementação ou requalificação de quebra-mares e, em outros casos, à construção de novas instalações portuárias. Numa fase preliminar torna-se essencial ponderar a razão entre o custo/benefício de todas as opções.

4.2.2. *Importância da Geologia Aplicada e da Geotecnia*

Antes de se prosseguir com o estudo do caso específico de Leixões, este tópico visa explicar a importância das áreas científicas da Geologia e Geotecnia na execução de empreitadas no âmbito da Engenharia (Pires et al., 2014, 2016).

A Geologia e a Geotecnia são áreas transversais e preliminares a todos os projetos de engenharia nos mais diversos setores, nomeadamente projetos relacionados com edifícios urbanos, rodovias, vias ferroviárias, diques, barragens, infraestruturas marítimas, entre outras muitas empreitadas desta tipologia (Oliveira, 1986; Chaminé et al., 2013).

Esta condição deve-se ao facto de tanto a Geologia como a Geotecnia serem ciências que se sustentam no conhecimento extensivo de todos os fatores e parâmetros interligados à exploração e análise do subsolo. Para fundar uma obra de Engenharia é fundamental conhecer as características das formações onde a mesma será implantada, havendo a necessidade de avaliar se estas têm uma capacidade de suporte superior às cargas que lhe serão transmitidas pela obra.

Sendo assim, o estudo da Geologia e da Geotecnia constitui o conjunto de atividades que devem ser desencadeadas para a obtenção de informação substancial previamente à realização de qualquer tipo de construção.

Por definição, a Geologia é a disciplina que estuda a estrutura da Terra, a sua composição e os seus componentes, sendo uma das mais inclusivas ciências naturais, utilizada na Engenharia como meio de conhecimento das propriedades físicas dos materiais e dos solos que dependem do seu processo de desenvolvimento (Chaminé et al., 2013).

A Geotecnia, por conceito, é o domínio da Engenharia que congrega todas as disciplinas científicas que se ocupam da caracterização e comportamento dos terrenos (Oliveira, 1986): a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas.

Por conseguinte, tanto a Geologia como a Geotecnia têm aplicações relevantes quanto ao estudo da composição, estabilidade, resistência e relevo do solo e, também, na descoberta e percepção de futuros efeitos naturais adversos, que terão conseqüentemente uma forte influência na escolha dos materiais apropriados à construção de qualquer obra de acordo com os impactos que estas poderão vir a sofrer (Oliveira, 1986).

Segundo o *British Standard Code of Practice for Site Investigations* (BS 5930:1981), toda a informação que é recolhida envolve o desenvolvimento de trabalhos de investigação minuciosos de reconhecimento implicando o desempenho dos seguintes procedimentos:

- Investigação preliminar (análise dos dados de caracterização já existentes);
- Reconhecimento geológico de superfície de forma pormenorizada, incluindo estudo fotogeológico;
- Prospeção mecânica, incluindo diferentes tipos de opções de investigação, desde sondagens diretas a semidiretas (obtenção de *hard data* do subsolo);
- Prospeção geofísica ou indireta (obtenção de *soft data* do subsolo);
- Ensaios de campo e laboratório para o devido balizamento e caracterização das propriedades mecânicas dos solos e rochas (em colaboração com a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas).

Tanto a Mecânica dos Solos como a Mecânica das Rochas envolvem o desenvolvimento de outro tipo de procedimentos de estudo de caráter predominante laboratorial, após a execução de ensaios de campo. No entanto, estes não serão aprofundados na presente dissertação.

A correta implementação do tipo de metodologia selecionada não só contempla uma grande vantagem no ponto de vista económico, porque previne a implementação de um tipo de fundação estrutural superestimada, evitando-se custos mais onerosos, como também dificulta a ocorrência de transtornos estruturais de natureza funcional e operacional, possibilitando assim que a estrutura tenha uma durabilidade adequada para o tipo de finalidade pretendida.

4.3. Enquadramento Geográfico e Descrição do Projeto

Situado no concelho de Matosinhos, distrito do Porto, mais propriamente no ramo extremo a montante da foz do rio Leça, onde perfaz a interligação entre as localidades de Matosinhos a sul com a de Leça da Palmeira a norte, o Porto de Leixões, ilustrado na Figura 51, caracteriza-se por ser uma infraestrutura portuária artificial. Considerada a maior da região norte e a segunda maior no

contexto nacional, o Porto de Leixões é abrigado por dois molhes destacados da linha de costa e que formam o Anteporto.

Este porto está apetrechado para a realização de um conjunto de atividades que vão desde a vertente comercial, a outras tantas que englobam distintos domínios, entre elas o turismo e lazer, entre outras.

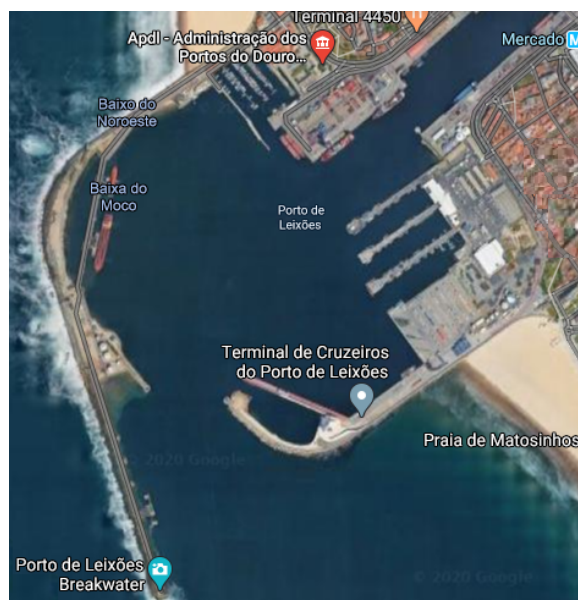


Figura 51 – Vista panorâmica da entrada do Porto de Leixões e do extremo norte da praia de Matosinhos (Google Earth, 2020).

O Porto de Leixões apresenta por isso uma elevada relevância do ponto de vista económico em todo a região norte do país e transversalmente no contexto nacional, tendo já sofrido inúmeras intervenções estruturais desde meados do século XX até aos dias de hoje.

Todas as recentes reformas estruturais têm estabelecido a maior parte das principais modificações morfológicas que têm sido implementadas e que integram assim toda a área que envolve a infraestrutura portuária atual.

No entanto, com o passar dos anos, e com a sempre expectável tendência de evolução marítima internacional devido à globalização e ao avanço da ciência, é previsível que os portos marítimos tenham que responder às exigências que se afiguram no horizonte futuro. Isso requer que os mesmos recorram não só à reabilitação, reconversão ou revitalização das suas infraestruturas portuárias, como também a outras reformas estruturais fundamentais de alguma magnitude.

Uma das reestruturações mais pertinentes neste âmbito é a implementação de medidas com vista ao empreendimento de ações estruturais com o objetivo de se proceder à extensão portuária da sua jurisdição territorial. Esta extensão poderá ser para o plano terrestre ou na orientação do plano de água de forma a amplificar a sua área de domínio. Com isto, estas infraestruturas podem

continuar a manter a sua competitividade, não só no contexto nacional como também no contexto internacional relativamente a outras infraestruturas portuárias relevantes.

Sendo assim, e dentro dessa órbita, a APDL prepara-se atualmente para avançar com três projetos fundamentais com vista a manter a sustentabilidade, a funcionalidade e a operacionalidade do Porto de Leixões, tanto a nível interno como no enquadramento marítimo externo.

As três obras são a criação de um novo terminal de contentores, o aprofundamento do canal de acesso ao Porto de Leixões e da bacia de rotação e, por fim, a extensão do quebra-mar exterior deste porto. Estes três projetos têm o objetivo não só de promover a melhoria da operacionalidade desta infraestrutura portuária, como também de reforçar as condições de segurança e de navegabilidade no acesso ao Porto de Leixões, na zona de manobra dos navios e no Anteporto, para assim permitir a captação de navios de maiores dimensões.

No entanto, apesar destes três projetos estarem interligados e serem essenciais para a futura evolução deste porto, será em seguida abordada em particular uma delas. Este projeto é o que envolve maior complexidade em termos de implementação, tanto a nível de meios, de tempo de execução e de recursos, bem como é o tema de investigação de estudo e de análise respeitante a esta dissertação. O projeto que será alvo de análise neste trabalho é o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

A extensão em 300 m do atual Molhe Norte em Leixões, representada pela Figura 52, é uma obra de grande envergadura e que envolve o estudo de um conjunto de critérios essenciais para que a mesma seja implementada dentro dos padrões que se pretende.

Um dos requisitos mais preponderantes em termos de estudo e perceção a ter em conta é o perfeito enquadramento das condições geológicas e geotécnicas presentes no domínio territorial e peninsular na qual se enquadra a área onde vai ser executada a obra. Preliminarmente, pretende-se obter um conhecimento integral do local onde irá ser implantada a estrutura dentro dos parâmetros previstos no projeto para que, após a consecução da mesma, esta consiga corresponder aos níveis de exigência previstos. Pretende-se, portanto, que esta estrutura mantenha a sua estabilidade de forma constante durante a vida útil prevista para a mesma.



Figura 52 – Localização e extensão prevista, em metros, que irá ser implementada na extremidade do atual quebra-mar exterior de Leixões (APDL, 2019).

4.3.1. *Conceção do Quebra-mar Exterior: Descrição e Enquadramento Geral da Estrutura*

No ano de 1933, depois das alterações e modificações implementadas nas zonas destinadas ao cais acostável em Leixões, e já com a infraestrutura portuária a passar por um processo ativo de consolidação exponencial em termos de proeminência no contexto marítimo nacional, seria também essencial reforçar outros setores relevantes, como por exemplo as condições de abrigo do Anteporto.

Por isso, foi tomada à data a decisão para a implementação e construção de um quebra-mar exterior com o intuito de melhorar as condições de segurança e navegabilidade no acesso à bacia portuária. A escolha das autoridades portuárias recaiu na implementação de um quebra-mar de tipologia vertical (Ferreira, 2009).

No entanto, já com o decorrer da obra durante o inverno entre a passagem do ano de 1934 para o ano de 1935, verificaram-se violentos e severos temporais que dizimaram totalmente a estrutura provisória quando já se encontravam executados 400 metros de extensão da mesma e, por isso, esta teve que ser completamente remodelada. Após a requalificação da estrutura danificada optou-se pela implementação de um quebra-mar submerso, de forma a reforçar a mesma no futuro. A base para o dimensionamento e implementação de um quebra-mar submerso no Porto de Leixões foi o quebra-mar de Casablanca, Marrocos, representado na Figura 53.



Figura 53 – Quebra-mar de Casablanca que serviu de base para o dimensionamento e implementação do quebra-mar submerso na sequência do desmoronamento do quebra-mar vertical norte (Fonte: Alamy, 2019).

No Anexo V está representado o desenho de projeto referente à secção transversal do elemento de proteção que serviu de base à execução do quebra-mar exterior.

Além disso, a reestruturação do quebra-mar exterior, finalizada em 1970, teria mais duas finalidades que seriam as de salvaguardar o acesso de elementos náuticos ao porto que quisessem atracar ou abrigar-se, assim como a finalidade de prover esta infraestrutura de garantias condizentes relacionadas com uma melhor otimização no processamento de outras operações realizadas no Porto de Leixões.

Já nos anos subsequentes viriam também a ser adicionados um número considerável de tetrápodes, o que veio a comprovar com expressão todas as debilidades associadas à estrutura de proteção, nomeadamente na área onde esta implantado o Posto de Acostagem A (“Posto A”), ilustrado na Figura 54.

Em função deste cenário e com a passagem do tempo perante invernos mais rigorosos, o quebra-mar exterior veio a apresentar contínuos problemas crónicos de galgamentos durante um número significativo e excessivo de dias em certos períodos sazonais. Estes problemas, quando associados à presença de correntes locais nas imediações do Posto A, acarretavam inúmeras ocorrências pautadas por sérias dificuldades relacionadas com a atracação de petroleiros, já que condicionariam em muito a manobra e acostagem dos mesmos, bem como a descarga de fluídos que, por sua vez, exige enormes precauções.

No entanto, a colocação de novos tetrápodes após a execução do quebra-mar exterior foi feita maioritariamente até ao ano de 1981, previamente à construção de um novo quebra-mar submerso complementar à estrutura principal localizado no extradorso do elemento de proteção primário. O

elemento submerso seria executado com o objetivo principal de aumentar a resistência da estrutura de proteção primária face aos fenómenos associados à agitação marítima.

A secção transversal idealizada em fase de projeto, que serviu de base à construção do quebra-mar submerso à cota de coroamento de $\pm 0,00$ m (ZHL), e que teve como principal intuito a proteção da zona da cabeça do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, evitando com que esse setor estivesse totalmente exposto aos fenómenos de agitação marítima, encontra-se representada no Anexo VI. No entanto, mesmo após a colocação de inúmeros tetrápodes e apesar da implementação do quebra-mar submerso, continuaram-se a verificar numerosos galgamentos de ondas em quantidades insustentáveis, que puseram em causa inúmeras vezes a funcionalidade mínima exigível que se pretendia para o Posto A.

Além disso, como esta estrutura está implantada juntamente à estrutura de proteção norte, o estudo de diagnóstico seria, por isso, incidido no elemento de proteção em si, de forma a perceber algumas particularidades do padrão de funcionamento hidráulico-estrutural do Molhe Norte. Com este estudo pretendia-se indicar soluções ponderadas, nomeadamente possíveis intervenções a implementar na estrutura para mitigar o problema principal em si, interligado aos galgamentos de ondas quando a agitação marítima se encontra muito ativa, ou para avaliar outras possíveis propostas adequadas à resolução do problema (Gomes et al., 2003).



Figura 54 – Imagem da extremidade do quebra-mar exterior onde se pode ver o Posto de Acostagem A (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Em síntese, todo este estudo acabou por ser algo inconclusivo na sua globalidade, fundamentalmente quanto ao critério de definição e elucidação que seria pretendido, muito por causa de uma clarividente dispersão de todos os dados que foram recolhidos (Gomes et al., 2003).

Face a todas estas evidências preocupantes, baseadas no relatório de estudo por parte do IHRH, na consequente degradação acentuada que a estrutura do quebra-mar exterior veio a sofrer ao longo dos anos (ver Figura 55), e também com todos os constantes problemas verificados paralelamente, tornava-se assim cada vez mais forçoso o pressuposto para uma intervenção no Molhe Norte. Esta intervenção deverá consistir na mitigação de todos os efeitos nefastos indicados acima e ter em vista a promoção de uma reconfiguração da estrutura que possibilita melhores condições de acessibilidade ao canal de aproximação da bacia portuária.

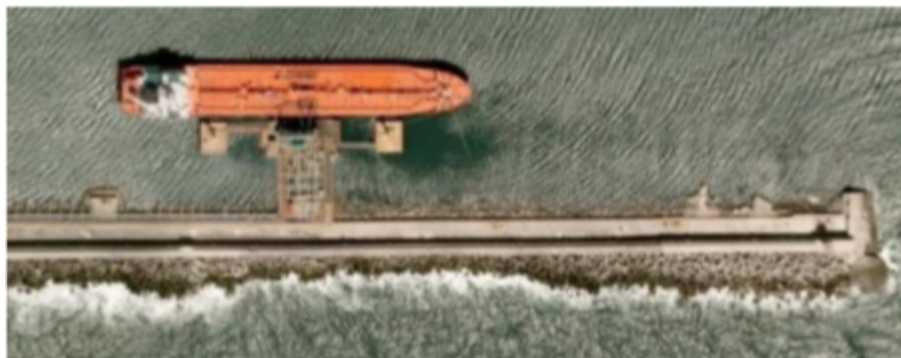


Figura 55 – Imagem da extremidade do quebra-mar exterior visivelmente deteriorado onde se pode visualizar o Posto de Acostagem A (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

4.3.2. Solução Estrutural e Características Gerais para a Extensão do Quebra-Mar Exterior

Sendo um porto que representa cerca de 25% do comércio externo português, o Porto de Leixões é abrigado por dois quebra-mares a norte e a sul, sendo que a hipótese de inoperacionalidade por algumas horas ou dias, devido a uma avaria num destes dois molhes pode representar prejuízos significativos na gestão deste porto (Cunha, 2009).

Por isso, após as duas últimas grandes obras de reconfiguração implementadas nesta infraestrutura portuária no ano de 2015, particularmente a renovação do Molhe Sul e a criação do novo terminal de cruzeiros, começou assim a ser cada vez mais manifesta a intenção, por parte das autoridades portuárias de Leixões, de melhorar as acessibilidades de acesso ao Porto de Leixões e de proceder à reconfiguração do quebra-mar exterior.

Para além disso, todo o enquadramento correlacionado com a globalização naval cada vez mais evidente impelia a necessidade de que fossem criadas condições propícias para responder às exigências desse cenário, nomeadamente condições de tráfego convenientes.

Ademais, os problemas crónicos associados à atual estrutura de proteção exterior, essencialmente a nível estrutural, funcional e operacional, baseados na clara deficiência de resposta aos efeitos adversos da agitação marítima, motivavam para que fossem feitas todas as diligências e tomadas as providências necessárias que promovessem a implementação destes dois últimos projetos em causa.

Pela magnitude e relevância que o Molhe Norte (ver Figura 56) tem na atividade do Porto de Leixões, bem como pelos danos que o manto resistente tem admitido ao longo dos anos, foram realizadas diversas investigações de modo a aferir e monitorizar todos os problemas crónicos que esta estrutura tem evidenciado. Desde a sua construção no final da década de 60 do século passado tem-se vindo a tentar minorar todas as lacunas que a obra vinha evidenciando, não só através de ações de reabilitação na estrutura, como também através da construção de um quebra-mar de abrigo submerso e da substituição e colocação de novos blocos de tetrápodes.



Figura 56 – Molhe Norte do Porto de Leixões (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Após vários estudos de modelação numérica e física e através de uma análise ponderada em apreciações estatísticas e morfológicas, bem como mediante análise e avaliação de ensaios de navegabilidade e de vários relatórios de avaliação e monitorização dos problemas técnicos que a estrutura apresentava foi submetido na Plataforma de Licenciamento Ambiental, no final do ano de 2017, o projeto de “Prolongamento do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões” para ser alvo de um EIA, com vista ao licenciamento do mesmo.

Subsequentemente, já em fevereiro de 2019, é lançado o concurso público para a reconfiguração e prolongamento do molhe exterior do Porto de Leixões, bem como de todas as medidas de implementação com vista à melhoria das acessibilidades marítimas desta estrutura portuária, por parte da APDL. O custo previsível associado a este projeto é cerca de 141 milhões de euros tendo um prazo de execução previsto de 30 meses, sendo que em fevereiro de 2019 foi também obtido um parecer favorável por parte da APA para a consecução de ambos os projetos, não sendo necessários outros estudos complementares acerca dos mesmos.

A obra de requalificação do Molhe Norte prevê um prolongamento do quebra-mar exterior existente em 300 metros, com um alinhamento de 20° para oeste. A tipologia de quebra-mar escolhida como solução recai num quebra-mar de taludes (Consulmar/Nemus, 2018).

Esta solução foi definida com base em alguns estudos efetuados anteriormente, assentes em algumas opções possíveis para a requalificação do Molhe Norte de Leixões, nomeadamente a investigação realizada em outubro de 2012 pelo Centro Jovellanos. Esta investigação baseou-se em duas possíveis opções para a extensão do elemento de proteção exterior em cerca de 200 ou 300 metros, e também em outras duas possibilidades inerentes relativamente à orientação do elemento, que manteria ou o alinhamento original ou ficaria posicionado com uma abertura de 30° para oeste relativamente ao alinhamento da estrutura já existente.

Finalmente, após uma ponderação criteriosa de todos os testes e ensaios realizados, conclui-se que a melhor opção recairia na requalificação do Molhe Norte com uma extensão do mesmo em 300 metros mas, no entanto, com a orientação do elemento delineada para uma amplitude menor, de 20° para oeste. Esta foi a configuração que apresentou melhores resultados ao nível do procedimento construtivo, da segurança naval, dos custos de construção, da manutenção da estrutura e da minoração de futuros danos ambientais.

Perante este enquadramento foi posteriormente levado a cabo outro estudo por parte da Consulmar no ano de 2017. Os resultados obtidos foram fundamentados por ensaios de estabilidade executados a uma estrutura de proteção em modelo reduzido com a mesma configuração e comportamento da opção estrutural definida.

Também este último estudo, relativo aos impactos dos fenómenos da agitação marítima no elemento de proteção, tinha já sido alvo de exploração e avaliação preliminar por parte do LNEC em 2016, para assim se poder proceder à fixação e aferição em termos da futura geometria do quebra-mar exterior.

Além disso, e tal como referido anteriormente, vai-se proceder paralelamente a esta empreitada ao aprofundamento do canal de aproximação com vista à melhoria das acessibilidades à entrada do Anteporto. Por isso, e com vista a conter e otimizar os custos e os recursos definidos para a obra de requalificação do quebra-mar exterior, determinou-se que o transporte e a aplicação do material de dragagem será exclusivamente realizado por via marítima. Ademais, todos os blocos que sejam alvo de remoção após a demolição da atual cabeça do Molhe Norte devem ser reutilizados caso reúnam condições de funcionalidade. Por fim também se determinou, do mesmo modo, que o núcleo da estrutura de proteção será totalmente constituído por material dragado extraído do fundo do mar (Consulmar/Nemus, 2018).

De acordo com o EIA efetuado, toda a requalificação e padrões construtivos associados à infraestrutura portuária constituirão a escolha mais vantajosa em termos de adaptação ao tráfego marítimo atual, sendo esta uma obra indispensável à concretização dos objetivos globais de modernização do Porto de Leixões. Desta forma evita-se, a curto prazo, a abdicação de certos armadores de procederem à atracação dos seus navios nesta infraestrutura portuária. Além do

mais, a concretização das duas empreitadas permite, adicionalmente, o acesso ao porto de forma mais favorável e segura dentro de diversos cenários meteo-marítimos mais desfavoráveis, ou mesmo até no caso de uma falha de funcionamento do rebocador de apoio, o que irá aprimorar a operacionalidade do porto no seu todo.

Complementarmente a este corolário serão assim criadas condições para o acesso e receção de navios de carga de maior volume, designadamente até 300 m de comprimento, 40 m de boca e 13,7 m de calado, ou seja, rondando os 5 000 TEU de capacidade (Fonte: apdl.pt, consultado em abril de 2020).

Presume-se que a duração da obra seja de 30 meses e que durante a interrupção dos trabalhos seja implementada uma estrutura provisória

Sem a realização de toda esta inversão e reconfiguração estrutural, outros possíveis investimentos no porto, tanto do lado do mar (cais) como do lado de terra (terraplenos), ficariam desde logo maioritariamente condicionados (ou mesmo inviabilizados) do ponto de vista operacional (Consulmar/Nemus, 2018).

Presentemente, para os atuais padrões de segurança que o Porto de Leixões dispõe, só há condições para a receção de navios de carga com um comprimento que não ultrapasse os 200 m (inferior a 3 000 TEU) (adaptado de Cleto, 1998).

Contudo, face à limitada movimentação de cargas do Porto de Leixões atualmente, fundamentalmente de carga contentorizada, não se espera que, com a consecução desta obra e com a possibilidade de se alcançar uma maior plenitude em termos da obtenção das condições adequadas para a receção de navios porta-contentores de maiores dimensões a escalar na cidade do Porto, isso se traduza num aumento proporcional em termos de carga movimentada. Prevê-se, no entanto, que se assista a uma redistribuição da frota naval que demandará futuramente esta infraestrutura portuária, diminuindo assim o número de escalas e mantendo sem embargo a capacidade total associada.

Em termos geométricos, a solução estrutural projetada é baseada nos estudos de análise ao pré-dimensionamento da estrutura realizados em especial pela Consulmar em 2017, tendo ficado delineado no projeto de execução a solução pelo prolongamento do quebra-mar exterior, fundamentado pelas seguintes características gerais:

- Reconfiguração e prolongamento do Molhe Norte em 300 metros, aproximadamente, a partir do coroamento atual;
- Orientação da nova estrutura para oeste, rodada em 20° em relação ao alinhamento atual;
- Solução de implementação de um quebra-mar de taludes convencional com um núcleo em TOT (topo do mesmo definido à cota +5,00 m, relativa ao ZHL) composto por material

rochoso a recuperar da dragagem dos fundos da bacia oceânica, protegido por filtros de enrocamentos selecionados;

- Opção por taludes com inclinação 2:1 (H:V) nos taludes exteriores e 1,5:1 (H:V) nos taludes interiores;
- Implementação de blocos para os mantos resistentes em betão de alta densidade, com 550 kN no tronco e 645 kN na cabeça da estrutura;
- Composição total do manto resistente em blocos Antifer de 800 kN ($\gamma_{\text{betão}} = 32 \text{ kN/m}^3$), iguais aos colocados no pé de talude do extradorso do tronco, sendo que o perfil de rotação da cabeça do molhe manterá igualmente estas características.

O manto de proteção do quebra-mar exterior terá as seguintes características:

- No extradorso do tronco, composição do manto de proteção por duas camadas de blocos Antifer. A implementação destes blocos será efetuada por meio da utilização da mesma cofragem utilizada na pré-fabricação da totalidade desses elementos, mas em moldes diferentes em função da zona de colocação;
- No intradorso do tronco, composição do manto de proteção por uma camada única de blocos Antifer de 680 kN ($\gamma_{\text{betão}} = 27,2 \text{ kN/m}^3$), com uma espessura de 2,9 m e um declive de 1,5:1 (H:V). O manto tem dispensa à cota - 9,90 m (ZHL) e o coroamento à cota +10,00 m (ZHL). Serão igualmente distribuídos um conjunto total de cerca de 5 960 blocos de betão do tipo Antifer. A altura dos blocos rondará os 2,9 m;
- No talude e no coroamento do manto, o betão utilizado terá uma massa volúmica $\gamma_{\text{betão}} = 27,2 \text{ kN/m}^3$, dispondo-se assim de blocos com 680 kN. A espessura total do manto será de 5,8 m, estendendo-se entre as cotas -13,25 m (ZHL), no limite inferior do talude, e +14,75 m (ZHL), no coroamento do manto.

O pé do talude da estrutura apresentará as seguintes características construtivas:

- Implementação de blocos Antifer com o mesmo peso dos elementos implementados no manto, nos mesmos moldes em que se encontram dispostos na estrutura já existente;
- Os blocos colocados serão compostos por betão de alta densidade com um $\gamma_{\text{betão}} = 32 \text{ kN/m}^3$, dispondo-se assim de blocos com 800 kN para serem distribuídos e implementados. Estes serão colocados entre as cotas -13,25 m e -7,45 m (ZHL).

No tronco do quebra-mar serão colocados filtros com características distintas no núcleo da estrutura:

- No intradorso do núcleo será colocado um filtro em enrocamento de gama entre 20 kN e 40 kN, com uma espessura de 2,2 m que inclui uma banquetta de 15 m à cota +9,90 m (ZHL), mantendo o elemento no entanto o mesmo declive até ao fundo;

-
- No extradorso do núcleo serão colocados dois filtros distintos, um interior em enrocamentos de gama entre 5 kN a 10 kN em camada tripla, com espessura de 2,2 m, ao qual se sobrepõe um segundo filtro em enrocamentos de gama entre 40 kN a 60 kN em camada dupla, com uma espessura de 2,6 m.

O quebra-mar será provido de uma superestrutura contínua em betão simples com as seguintes características:

- Superestrutura com 13 m de largura, que funda sobre o submanto à cota +7,20 m (ZHL), sendo a cota do coroamento da estrutura definida a uma altura de +13,00 m (ZHL), aproximadamente, a qual não inclui muro-cortina;
- Interligação da superestrutura em betão simples com a superestrutura da atual cabeça existente, alinhando o seu paramento exterior com a do muro-cortina na zona de contacto. Esta interligação implicará a implementação de um segmento de transição instaurado nos últimos 41 m da superestrutura do quebra-mar existente, com uma secção de altura variável entre a plataforma circulável já existente, desde a cota +6,30 m (ZHL), até à cota da nova estrutura a +13,00 m (ZHL), a qual se efetuará numa zona angulada, e com a betonagem desta extensão de molde a formar uma rampa com inclinação constante de 10% até à superfície do muro vertical frontal, definida à cota +10,30 m (ZHL);
- Juntas de dilatação da estrutura do molhe espaçadas em 10 m entre cada uma;
- Implementação de um farol para o assinalamento marítimo da extensão do quebra-mar exterior renovado, integrado na superestrutura da nova cabeça (Consulmar/Nemus, 2018).

Na Figura 57 é possível visualizar a área que vai integrar o prolongamento da atual estrutura de proteção exterior a norte do Porto de Leixões. Também se consegue observar as áreas que abrangem os acessos à obra, bem como outros setores como as áreas de apoio à construção, nomeadamente o estaleiro de obra e a zona de *stock* de enrocamentos.



Figura 57 – Localização da área de integração do projeto de extensão do quebra-mar exterior, acessos à obra, estaleiro e zona de *stock* de enrocamentos (Nemus, 2018).

No Anexo VII pode-se visualizar a planta estrutural de implementação do quebra-mar exterior com a disposição dos diferentes perfis transversais PT1, PT4 e PT10 (ilustrados no Anexo VIII) (Consulmar, 2017).

O perfil designado por PT10 ilustra a distribuição de blocos Antifer pelo manto resistente no talude exterior e interior do novo segmento de extensão do Molhe Norte. O segundo perfil, designado por PT4, ilustra a zona de implementação inicial do novo segmento de extensão do Molhe Norte. Por fim, o perfil PT1 ilustra o extremo do novo segmento do molhe a ser implementado onde ficarão também situados os acessos de obra e as áreas de apoio à construção.

4.4. Enquadramento Geológico da Área Envolvente do Porto de Leixões

No âmbito do tema desta dissertação será agora abordada a componente de cartografia inerente ao projeto de prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, de forma a representar e expor a geologia caracterizante da área circundante a este porto.

O Porto de Leixões fica localizado numa zona muito problemática do ponto de vista geológico por se encontrar muito próximo da zona de cisalhamento Porto-Coimbra-Tomar (Chaminé et al., 2003). Tratando-se de uma área localizada numa zona de costa é muito característico que o substrato rochoso nem sempre aflore e, por isso, o adequado procedimento neste tipo de situações é um levantamento geotécnico com recurso a métodos semidiretos ou indiretos, como sondagens e métodos geofísicos. A observação direta neste espaço seria escassa e manifestamente insuficiente tendo em conta a importância da obra. Por isso, os parâmetros a ter em conta na avaliação das metodologias que serão selecionadas, tendo em conta o pré-estudo a realizar para a consecução deste tipo de estruturas costeiras, serão a coluna de água e a cobertura sedimentar que cobre o

substrato rochoso na zona do Porto de Leixões. Sendo assim, e neste enquadramento, faz sentido que seja levado a cabo um levantamento cartográfico realizado em 3 áreas distintas muito específicas:

- Área submersa do Porto de Leixões;
- Área submersa a oeste da costa e a norte e a sul do Porto de Leixões;
- Área costeira que se prolonga desde o Forte de S. Francisco Xavier (Castelo do Queijo) até ao Farol da Boa Nova.

Na área submersa do Porto de Leixões (Área 1) o levantamento foi feito tendo em conta resultados de sondagens feitas previamente por empresas de geotecnia e dados de reflexão sísmica de alta resolução. Na área submersa a oeste da costa e a sul do Porto de Leixões (Área 2), o levantamento foi executado com base nos estudos cartográficos da área submersa do Porto de Leixões e da área referente que engloba o espaço terrestre entre o Forte de S. Francisco Xavier e o Farol da Boa Nova tendo como fundamentação as interpretações e observações analisadas nestes dois mesmos estudos (Área 1 e Área 3).

Por fim, na área costeira entre o Forte de S. Francisco Xavier e o Farol da Boa Nova (Área 3) em que o estrato de superfície é constituído por afloramentos rochosos, o levantamento pôde ser executado por via de observação técnica.

Estas áreas encontram-se representadas sobre a carta geológica de Portugal na Figura 58.

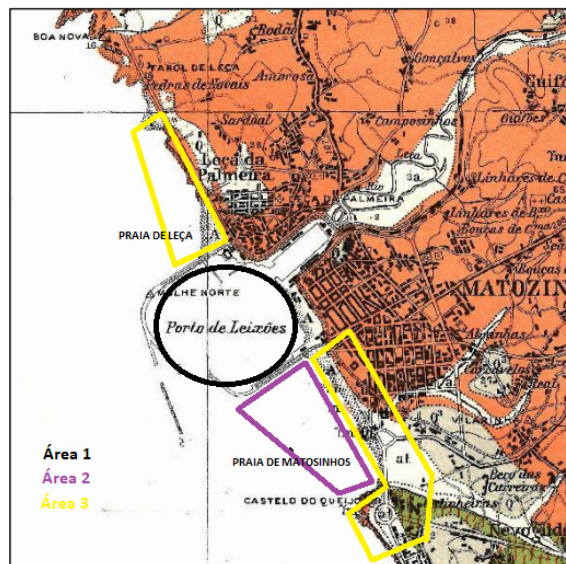


Figura 58 – Enquadramento panorâmico das 3 áreas definidas para o estudo e execução do levantamento cartográfico que foi implementado (adaptado de Teixeira & Costa, 1957).

Pela observação da Figura 58, e tendo em conta estudos precedentes, pode-se constatar que a litologia que caracteriza maioritariamente a área envolvente ao Porto de Leixões, nomeadamente as zonas circundantes para lá do Molhe Norte e do Molhe Sul, é o granito do Porto. Este é ilustrado por um cor-de-laranja suave e que é distinguido por ser um granito alcalino com características de

grão médio a grosseiro de duas micas e de cor clara. Pode-se também observar uma zona a esverdeado pertencente à Área 3 (área costeira entre o Forte de S. Francisco Xavier e o Farol da Boa Nova) em que a litologia constituinte da mesma é formada por distintos tipos de rochas, entre elas migmatitos, que são rochas metamórficas de médio a alto grau, gnaisses, micaxistos, xistos luzentes, entre outros.

Na zona do Forte de S. Francisco Xavier, a sul da Área 3, pode-se reparar que no vértice da área delimitada a amarelo encontra-se uma área ilustrada a laranja e que do lado oposto, colorido a verde, verifica-se a presença litológica de um conjunto de rochas metamórficas (Teixeira & Costa, 1957). Por isso, e tendo em conta esta perspetiva em termos de dados geológicos que tiveram em conta investigações preliminares executadas nestas 3 áreas de estudo, foram também adicionalmente realizados outros estudos enquadrados na área periférica do Porto de Leixões a norte (Farol da Boa Nova, em Leça) e a sul (praia de Matosinhos até ao Forte de S. Francisco Xavier) (Pacheco, 2014). Estes estudos de reconhecimento litológico foram maioritariamente executados através de observação direta, salvo alguns locais em que o maciço rochoso estava coberto por sedimentos ou submerso. Nestes locais foi preferível levar a cabo um estudo de investigação mais rigoroso de forma a se obter uma melhor representação em termos geológicos e geomorfológicos para efeitos de integração cartográfica. A litologia presente na zona periférica ao Porto de Leixões é representada pela Figura 59. Assim sendo, de acordo com Pacheco (2013), foram reconhecidas três distintas litologias primordiais, tendo em conta todos os estudos de levantamentos cartográficos e todas as investigações preliminares executadas nestas zonas, designadamente granitos, gnaisses e micaxistos.

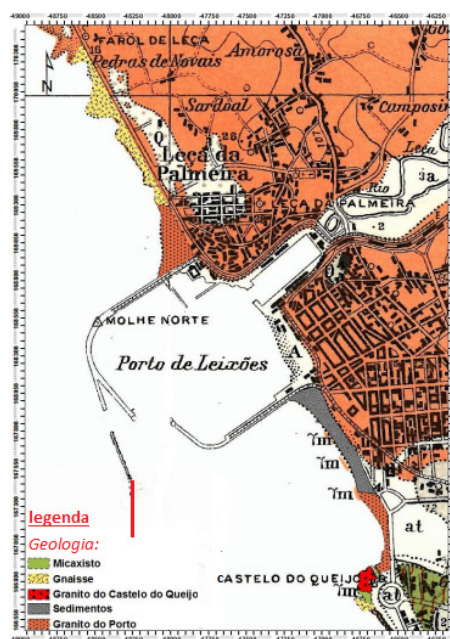


Figura 59 – Litologia presente na área periférica terrestre a norte e sul do Porto de Leixões, desde o Farol de Leça até ao Forte de S. Francisco Xavier (adaptado de Teixeira & Costa, 1957).

A cobertura aluvionar é composta por sedimentos lodosos com componente silto-arenosa e alguns seixos rolados. Esta estabeleceu-se pela deposição destes materiais nesta zona portuária, após os mesmos terem sido transportados através do rio Leça e pela transferência de areias da praia de Matosinhos, que se situa na periferia a sul desta infraestrutura marítima (Pereira, 1992; Afonso et al., 2004).

Na Figura 60 pode-se observar a disposição do Porto de Leixões na carta geológica do concelho de Matosinhos.

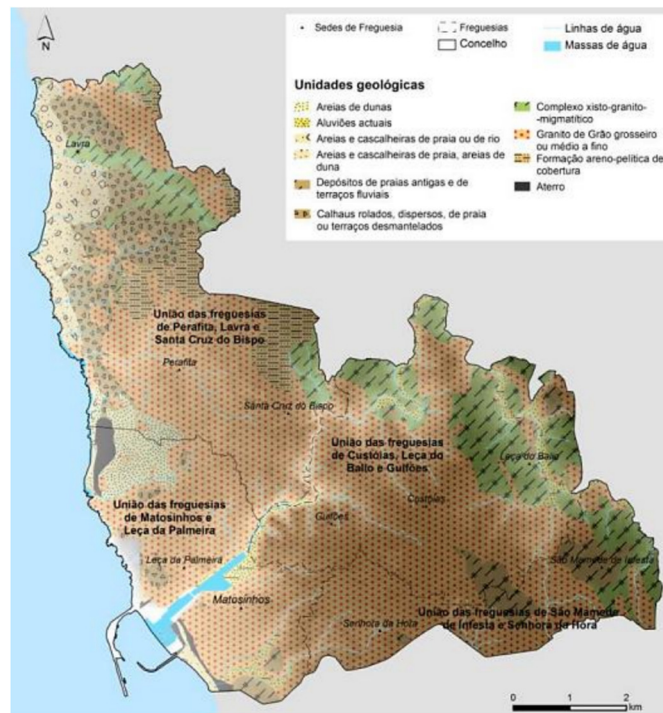


Figura 60 – Disposição do Porto de Leixões na Carta Geológica do concelho de Matosinhos (segundo Teixeira & Costa, 1957 in: Guerra, 2010).

4.5. Condições Geotécnicas da Área Interior do Porto de Leixões

Seguidamente será abordada a componente interligada com a cartografia geológica associada à área global interior do Porto de Leixões, onde o projeto de extensão do quebra-mar exterior vai ser executado. Serão analisados dados de quatro campanhas de sondagens solicitadas pela APDL que tiveram como objetivo definir a profundidade e a natureza do substrato rochoso no Porto de Leixões. As duas primeiras tiveram como intuito outros fins de interesse da empresa e servem agora como suporte de apoio da presente dissertação.

Uma campanha de sondagem tem uma enorme importância para a solução final de qualquer projeto de obra pois é muito importante identificar as camadas do subsolo que irão influenciar os estudos de estabilidade do mesmo. Não menos relevante, uma campanha de sondagem permite a determinação das características geológicas e geotécnicas desse mesmo subsolo.

Dos quatro programas de trabalho de investigação realizados, três deles foram fundamentados pelas convencionais sondagens mecânicas que são métodos semidiretos de investigação do subsolo que permitem reconhecer as rochas em profundidades inalcançáveis por trincheiras ou poços de pesquisa, essencialmente por fatores económicos.

Todavia, todos estes métodos serão sempre maioritariamente inconclusivos se não forem integrados com dados de outra natureza, como os que são obtidos por prospeção geofísica, dada a sua natureza de amostragem pontual.

O elevado custo da realização de sondagens com amostragem faz com que este seja aplicado apenas pontualmente realizando-se interpolações espaciais com recurso a técnicas de geoestatística sobre os dados geofísicos (Pinheiro et al., 2011).

Os principais objetivos de todas as campanhas de prospeção realizadas no Porto de Leixões, apesar de direcionadas para projetos diferentes, são os seguintes:

- Conhecimento das cotas de possíveis unidades litológicas relativamente ao Zero Hidrográfico de Leixões (ZHL);
- Determinação da profundidade do *bedrock* em relação ao fundo do mar;
- Informação acerca da profundidade total atingida pela sondagem;
- Conhecimento quanto à natureza do maciço rochoso, caso este seja atingido.

Deve-se constatar que o tipo de sondagem utilizadas nestas campanhas geológicas foram assistemáticas pois os furos de sonda foram isolados em vez de obedecerem a um formato de malha (Pacheco, 2014).

Segue-se a análise de três das quatro campanhas de investigação. As mesmas foram realizadas entre o período de 2004 a 2009; uma no âmbito de uma prospeção geológico-geotécnica executada nas áreas do Anteporto e do Canal de Acesso à Doca nº 4 do Porto de Leixões e as outras duas no âmbito da construção do Terminal de Cruzeiros e Passageiros do Porto de Leixões.

Por solicitação da APDL, a Tecnasol FGE (“Tecnasol”), uma empresa de fundações e geotecnia, levou a cabo a execução da primeira campanha geológico-geotécnica no ano de 2004 na zona do Anteporto e do Canal de Acesso à Doca nº 4.

Esta campanha distribui-se por cinco zonas distintas do Porto de Leixões em que foram realizados 39 furos:

- Anteporto: nove furos de sondagem;
- Posto B: seis furos de sondagem;
- Posto C: dois furos de sondagem;
- Molhe Sul: seis furos de sondagem;
- Canal de Acesso à Doca nº 4: dezasseis furos de sondagem.

A campanha foi efetuada numa plataforma flutuante, sendo utilizadas sondas que foram montadas sobre esta. Os resultados finais foram baseados na litologia, na fraturação e no grau de alteração do maciço rochoso, bem como no índice de qualidade da rocha, RQD, quando assim foi necessário (Tecnasol, 2004).

Foram detetadas três unidades litológicas distintas: aluviões, granitos e metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico (“CXG”), sendo que dos 39 furos de sondagem realizados apenas 26 atingiram a base rochosa (Pacheco, 2014; adaptado de Tecnasol, 2004).

Na Figura 61 encontra-se representada a localização de cada furo de sondagem realizado nesta campanha de prospeção.



Figura 61 – Posicionamento das sondagens executadas no âmbito da campanha de prospeção no Anteporto e no canal de acesso à Doca nº 4 do Porto de Leixões (adaptado de Tecnasol, 2004; in Pacheco, 2014).

Nesta campanha o equipamento utilizado foi o seguinte (Tecnasol, 2004; Pacheco, 2014):

- Sondagens de percussão *Edeco Pilc* utilizadas nas zonas aluvionares revestidas por colunas de tubos metálicos. Neste tipo de sondagem o furo é aberto com queda e recuperação sucessiva de um trépano;
- Sondagens rotativas utilizadas ao atingir a rocha-mãe com carotagem contínua, utilizando-se amostradores de parede dupla com diâmetro de 86 mm;
- Amostradores do tipo Moran utilizados para zonas de aluviões de consistência baixa a muito baixa.

Em 2009 foram levadas a cabo as duas campanhas restantes, tendo estas sido realizadas por outra empresa, a GEOMA – Geotecnia e Mecânica de Solos.

Em ambas as campanhas foram executados 10 furos de sondagem, sendo o objetivo da primeira explorar e analisar em termos geológico-tectónicos a área proposta para execução do projeto de construção do Terminal de Passageiros do Porto de Leixões.

A segunda campanha tinha como objetivo identificar as condições geológico-tectónicas ocorrentes na área proposta para a execução do Projeto de Obras Marítimas do Terminal de Cruzeiros de Leixões.

No primeiro programa de investigação, dos 10 furos de sondagem executados, ilustrados na Figura 62, só 9 atingiram o *bedrock*, tendo sido identificadas apenas duas unidades litológicas: aluviões e metassedimentos do CXG. Ao invés, a segunda campanha de investigação (ver Figura 63), realizada no âmbito do mesmo projeto, todos os 10 furos de sondagem executados atingiram o *bedrock*. Foram identificados, tal como na campanha da Tecnasol executada em 2004, três unidades litológicas já referidas nessa campanha, ou seja, aluviões, granitos e metassedimentos do CXG.

Nesta campanha da Geoma, o equipamento utilizado foi o seguinte (Pacheco, 2014):

- Sonda rotativa do tipo Rolatec RL 48-L, tendo sido feito o revestimento das paredes aluvionares com tubos de revestimento metálico;
- Ao se atingir o *bedrock* a furação prosseguiu com carotagem contínua usando carotadores do tipo T2.



Figura 62 – Posicionamento dos furos das sondagens executados na campanha realizada em 2009 no âmbito do projeto de construção do Terminal de Passageiros do Porto de Leixões (Molhe Sul) (Pacheco, 2014).



Figura 63 – Posicionamento dos furos das sondagens executados na campanha realizada em 2009 no âmbito do projeto de construção do Cais do Porto de Leixões (Molhe Sul) (Pacheco, 2014).

4.5.1. *Unidades Litológicas Identificadas*

Assim sendo, foram detetadas três litologias distintas com a concretização das três campanhas de investigação analisadas anteriormente. Estas litologias serão retratadas mais pormenorizadamente em seguida.

Na grande maioria das sondagens levadas a cabo nas 3 campanhas realizadas pela Tecnasol e pela Geoma foram detetadas aluviões sobrejacentes ao substrato rochoso, não tendo sido possível em alguns furos atravessar a totalidade da camada aluvionar devido à profundidade do furo ser insuficiente.

Esta unidade litológica foi decomposta em dois tipos de litologias:

- Lodos cinzentos e negros por vezes ligeiramente arenosos; em alguns pontos foi reconhecida uma base de areias de granulometria média a grosseira com elementos pontuais de seixos subrolados;
- Areias de grão fino, localmente lodosas.

Foi atribuída uma consistência muito fraca a esta unidade aluvionar baseada nos ensaios de SPT realizados pela Geoma. Essa mesma consistência veio a apresentar alguma melhoria ao nível da base da camada devido à presença de granulometrias de material mais grosseiro (Pacheco, 2014). Relativamente aos “granitos do Porto”, os mesmos só foram detetados na campanha de sondagens da Tecnasol de 2004 e numa das campanhas levadas a cabo pela Geoma, em 2009. Do total de 59 furos de sondagens executados nas 3 campanhas de investigação levados a cabo até esta data foram apenas reconhecidos dois tipos de granitos – e somente em 12 furos de sondagem – sendo estes:

- Granitos decompostos recuperados como saibros graníticos de grão médio a fino, siltosos e micáceos, com cor acinzentada e castanho-claro esbranquiçado, com fragmentos locais e dispersos de granito menos alterado;
- Granitos de grão médio com textura gnáissica, de tons creme acinzentado ou acastanhado, com duas micas.

De um modo geral estes materiais apresentavam-se medianamente alterados com fraturas relativamente afastadas, com bordos ligeiramente rugosos, oxidados e ondulados. A percentagem de recuperação apresentou-se com valores entres os 53% e os 100% e o RQD, quando existente, encontrava-se entre valores abaixo dos 50%, maioritariamente (Pacheco, 2014).

O Xisto-Grauváquico foi o substrato rochoso mais vezes identificado na generalidade dos furos de sondagem executados nas 3 campanhas de prospeção geológica já mencionadas. Por conseguinte, foram assim reconhecidas duas litologias distintas pertencentes a esta unidade rochosa, sendo estas:

-
- Xistos luzentes decompostos recuperados como areias de grão fino, argilosas ou argiloarenosas, micáceas, de cor castanha e com fragmentos pontuais e dispersos de xisto menos alterado;
 - Xistos luzentes argilosos, micáceos, de cor acinzentada e acastanhada, localmente com textura gnáissica de cor amarela esbranquiçada.

Esta unidade litológica apresentou-se, de um modo geral, medianamente alterada com fraturas mais próximas do que aquelas que foram reconhecidas nos granitos do Porto mas também com bordos ligeiramente rugosos, oxidados, lisos e ondulados.

A percentagem de recuperação apresentou-se com valores entre os 29% e os 100% e o RQD, quando existente, apresentou-se com valores maioritariamente abaixo dos 50% (Pacheco, 2014).

4.5.2. Resultados do Programa de Sondagens da Tecnasol

Das três campanhas de sondagem analisadas, a campanha de sondagens da Tecnasol foi a mais íntegra em termos de amplitude espacial. No total das 39 sondagens da campanha da Tecnasol foram atingidos 140,91 metros de furação, dos quais 77,26 metros foram executados à percussão e 63,65 metros à rotação. As profundidades dos furos de sondagem ficaram compreendidas entre os 1,5 metros e os 12,5 metros (Tecnasol, 2004; in Pacheco, 2014).

No Quadro 10 abaixo estão indicados os dados mais essenciais relativos aos 39 furos de sondagem efetuados na campanha da Tecnasol em 2004.

Quadro 10 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Tecnasol.

Sondagem	Coordenadas		Cota do topo	Profundidade do soco (m)	Litologia	Profundidade do furo (m)
	M	P				
1	-48374	168205	-10,1	0	CXG	1,5
2	-48354	168303	-10	0	CXG	1,5
3	-48295	168088	-8	0	CXG	3,3
4	-48276	168186	-9,1	0	CXG	2,7
5	-48256	168248	-9,4	0	CXG	2,5
6	-48185	167768	-13,09			1,5
7	-48156	168014	-9,84	0	CXG	2,1
8	-48163	168162	-9,5	0	CXG	3,4
9	-48154	168273	-10,89	0	CXG	2,5
10	-48104	167869	-12,29			2,25
11	-47977	167998	-10,29			4
12	-47984	168139	-10,89	2,45	CXG	3,2
13	-48000	168292	-10,39	0	CXG	2,5
14	-47863	167805	-8,1	0,1	CXG	3,5
15	-47811	167945	-11,74	0,5	CXG	1,7
16	-47789	168114	-11	0,6	CXG	2
17	-47829	168273	-10,84			3,75
18	-47849	168407	-10,09			4,3
19	-47675	167900	-8,8	0	CXG	4,6
20	-47643	168095	-7,49	1,5	CXG	7,2
21	-47479	168074	-2,09	1,4 + 9,2	CXG + GR	12,3
22	-47346	168032	0	0	GR	12,5
23	-47699	168405	-10,49			3,55
24	-47681	168520	-10,99	0	GR	3,1
25	-47568	168552	-10,89			3,11
26	-47523	168647	-10,79	0	GR	3,05
27	-47425	168690	-10,79			3,6
28	-47383	168795	-10,59			3,6
29	-47272	168819	-10,59	3,5	CXG	3,7
30	-47222	168912	-10,44			3,65
31	-47120	168948	-10,19			4,15
32	-47037	169053	-11,59			3,15
33	-46910	169094	-10,94	0	GR	3,3
34	-46864	169185	-11,69	0	GR	2,5
35	-46754	169218	-11,44	0	GR	3
36	-46686	169316	-11,64			2,65
37	-46575	169341	-11,09	0,2	GR	3,3
38	-48328	168434	-6,74	0	GR	3,5
39	-48230	168414	-8,09	0,1	CXG	3,2

Os espaços não preenchidos no Quadro 10 simbolizam alguns furos em que o maciço rochoso (soco) não foi atingido devido à sua profundidade, tendo-se recolhido apenas aluviões. A cor-de-rosa, referente ao furo de sondagem 21, verifica-se a única recuperação de dois tipos de unidades litológicas em simultâneo: CXG e granito.

4.5.3. Resultados do Programa de Sondagens da GEOMA – Terminal de Passageiros

Relativamente à primeira campanha de sondagens da Geoma, realizada em 2009 e referente ao estudo no âmbito do projeto de implementação do Terminal de Passageiros, só foram detetadas duas unidades litológicas, que foram: aluviões e metassedimentos do CXG.

As profundidades destes furos de sondagem ficaram compreendidas entre os 5,25 metros e os 13,65 metros (Pacheco, 2014).

No Quadro 11 abaixo estão indicados os dados mais relevantes relativos aos 10 furos de sondagem efetuados na campanha da Geoma, ilustrados pela Figura 62.

Quadro 11 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Geoma no âmbito do projeto de implementação do Terminal de Passageiros.

Sondagem	Coordenadas		Cota do topo	Profundidade do soco (m)	Litologia	Profundidade do furo (m)
	M	P				
1	-47728,6	167737,57	-8,1	3,5	CXG	10,75
2	-47706,39	167725,61	-10,7	2	CXG	10,45
3	-47754,89	167736,38	-8,3	4	CXG	7,85
4	-47740,91	167724,84	-7,35	5,4	CXG	12,7
5	-47715,68	167715,43	-6,4	4,5	CXG	7,6
6	-47765,38	167719,6	-7,7	4	CXG	10,6
7	-47746,98	167711,6	-6,95	5,5	CXG	13,1
8	-47726,59	167702,82	-6,9	3,7	CXG	7,1
9	-47759,94	167695,18	-5	6	CXG	13,65
10	-47733,9	167688,73	-5			5,25

Os espaços não preenchidos na linha a cor-de-rosa do Quadro 11 simbolizam o furo em que o maciço rochoso (soco) não foi atingido devido a um problema técnico, tendo-se recolhido apenas aluviões.

4.5.4. Resultados do Programa de Sondagens da GEOMA – Cais

Já relativamente à segunda campanha de sondagens da Geoma, também realizada em 2009 e referente ao projeto de construção do Cais de Leixões, no âmbito do projeto geral de implementação do novo Terminal de Passageiros, foram detetadas três unidades litológicas distintas, que foram: granito, metassedimentos do CXG e aluviões. As profundidades dos furos de sondagem desta campanha ficaram compreendidas entre os 5,7 metros e os 24 metros (Pacheco, 2014).

No Quadro 12 abaixo estão indicados os dados mais relevantes relativos aos 10 furos de sondagem efetuados na campanha da Geoma referente ao projeto do Cais de Leixões, ilustrados na Figura 63.

Quadro 12 – Dados referentes às sondagens executadas na campanha da Geoma no âmbito da obra de implementação do Cais de Leixões.

Sondagem	Coordenadas		Cota do topo	Profundidade do soco (m)	Litologia	Profundidade do furo (m)
	M	P				
1	-47994,6	167874	-9,85	18	CXG	24
2	-47948,68	167854,22	-8,5	7,5	CXG	13,5
3	-47902,76	167834,44	-8,5	5	CXG	12,5
4	-47856,83	167814,67	-8,5	6	CXG	13,5
5	-47810,91	167794,89	-8,3	4,5	CXG	10,8
6	-47764,99	167775,1	-8,5	1,5	CXG	7,2
7	-47719,07	167755,33	-8,5	0,5	CXG	5,7
8	-48020,42	167814,05	-8,7	1	GR	7
9	-48002,11	167822,11	-6,6	6,5	GR	13,2
10	-47978,02	167796,03	-5,7	3,85	GR	10,65

Em síntese pode-se observar na Figura 64, ilustrada por símbolos assinalados com cores distintas e descritos na legenda da figura, a distribuição espacial de todas as sondagens realizadas na área da APDL referentes a cada um dos projetos correspondentes analisados anteriormente. Esta figura inclui a descrição da litologia do *bedrock* quando o soco foi atingido, ou das unidades geológicas sobrepostas ao substrato rochoso quando o soco não foi atingido (sondagens representadas a azul).

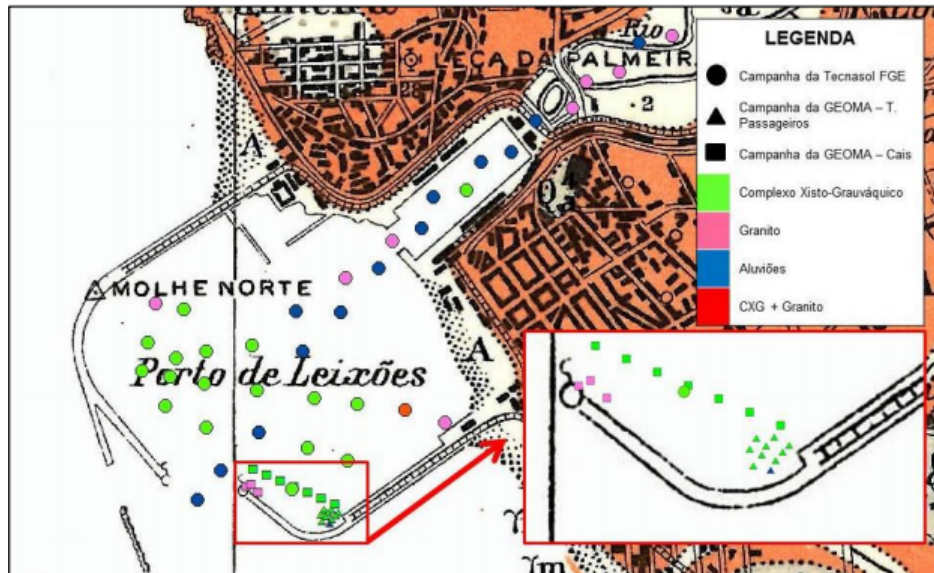


Figura 64 – Distribuição espacial de todos os furos de sondagens realizados na área da APDL e integrados na carta geológica do Porto de Teixeira & Costa 1957 (segundo Pacheco, 2014).

Na Figura 64 pode-se observar em detalhe, no canto inferior direito, a zona das duas campanhas de sondagens da Geoma de 2009, cujos furos foram realizados numa área mais circunscrita. Na legenda está simbolizada por cores a litologia do substrato rochoso quando atingido, sendo que os símbolos a azul estão legendados como unidade de aluvião, pois o *bedrock* nesses pontos não foi alcançado. De referir também que foi legendado com um círculo avermelhado a sondagem nº 21 da Tecnasol que atingiu os 12,3 metros de profundidade, tendo conseguido atravessar a camada litológica de xistos e atingido a camada de granito (Pacheco, 2014).

Pode-se também observar na Figura 64, através da representação espacial da globalidade de todos os furos de sondagens executados, que a litologia de granito foi detetada junto à área onde fica localizado o atual Posto C da infraestrutura portuária, junto ao farol do Molhe Sul, nas áreas onde está implantado o Terminal Multiusos, bem como nas Docas nº 1, 2 e 4 e à entrada da primeira.

O CXG foi somente detetado em duas zonas de forma isolada: no canal de entrada portuário e na zona da Doca nº 1 (Pacheco, 2014).

4.5.5. Resultados do Programa de Sondagens da ARGONVIA

Em janeiro de 2019, foi levada a cabo uma campanha de prospeção por parte da ARGONVIA – Serviços de Engenharia, Lda., solicitada pela APDL no âmbito do “Projeto de Execução das

Acessibilidades Marítimas ao Porto de Leixões”. A campanha consistiu na execução de 16 sondagens à rotação com transmissão hidráulica (acompanhadas por ensaios SPT) em ambiente aquático na bacia portuária e no canal de acesso ao Porto de Leixões. O Anexo IX demonstra, em planta, a localização de cada uma das sondagens realizadas no âmbito desta campanha. Os trabalhos realizados são observados no Quadro 13.

Quadro 13 – Resumo dos tipos e quantidades de trabalhos realizados na campanha de prospeção da Argonvia (ARGONVIA, 2019).

Tipo	Quant.
Sondagens	16
Furação em solos e/ou em rocha branda (m)	51.8
Furação em rocha (m)	52.5
Ensaio SPT	54
Ensaio de laboratório	
Ensaio de compressão simples	13
Determinação do peso específico	3
Análise granulométrica por peneiração	11
Análise granulométrica por peneiração e sedimentação	3
Determinação do teor em água	14
Determinação dos limites de liquidez e de plasticidade	20

O zonamento geotécnico proposto pela Argonvia baseou-se na litologia, ensaios SPT e resistência à compressão, assim como nos parâmetros semi-empíricos de caracterização do maciço rochoso, i.e. W, F e RQD. Foi possível definir 6 horizontes geotécnicos, ilustrados na Figura 65.

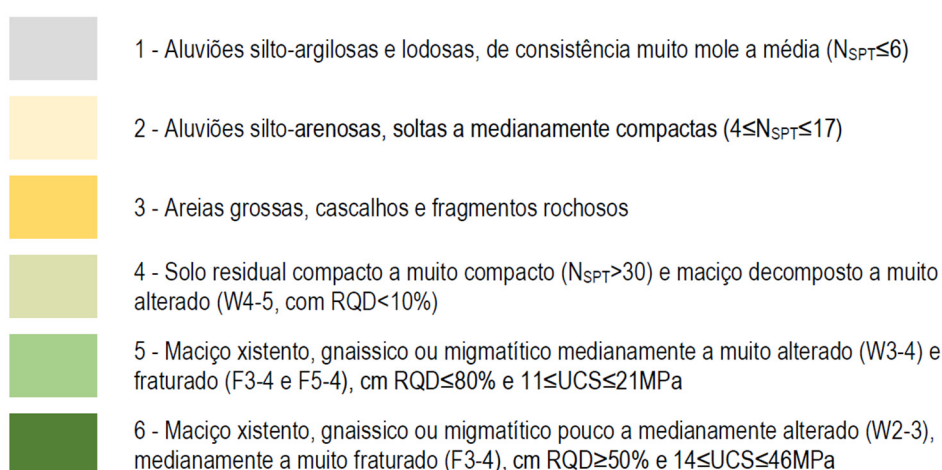


Figura 65 – Horizontes geotécnicos definidos pela Argonvia para a bacia portuária e canal de acesso ao Porto de Leixões (ARGONVIA, 2019).

4.5.6. *Levantamentos Geofísicos e Recolha de Dados para Análise*

Depois de se ter desenvolvido uma análise de investigação cartográfica relativamente às condições geotécnicas do Porto de Leixões, através da avaliação de dados de observação direta e de outros métodos semidiretos, será agora avaliado um conjunto de dados indiretos adquiridos pela Universidade de Aveiro (“UA”) em 2009. A análise efetuada aos dois primeiros métodos de investigação que se realizaram é manifestamente insuficiente por si só, dada a natureza e o tipo de amostragem de características pontuais associadas a esse tipo de ensaios.

As diferentes estruturas geológicas presentes na subsuperfície e na crosta terrestre apresentam diferentes propriedades físicas que as distinguem. É graças a estas condições que a prospeção geofísica assume uma importância significativa para o estudo aprofundado de qualquer formação geológica. Através destes métodos de prospeção indireta é possível detetar de forma mais plena as diferenças de propriedades entre essas mesmas estruturas (Pacheco, 2014).

Um dos métodos mais convencionais de prospeção indireta são os métodos de reflexão sísmica. Esta foi a técnica que a UA utilizou numa campanha de prospeção indireta e que irá ser abordada de seguida.

O método de reflexão sísmica consiste essencialmente na emissão de ondas através de uma fonte de energia para o subsolo que, através da reflexão e captação das mesmas, transmite dados relevantes que serão interpretados posteriormente de forma a se conseguir distinguir diferentes tipos de unidades litológicas. Com este método é possível localizar uma interface entre formações adjacentes com propriedades distintas (Sheriff & Geldart, 1995).

Uma onda sísmica ao encontrar uma interface entre dois materiais com impedâncias acústicas (produto da densidade pela velocidade de propagação das ondas sísmicas) diferentes irá ser parcialmente refletida de volta em direção à fonte de emissão.

Todos os dados foram adquiridos no âmbito de uma investigação para caracterização dos sedimentos que se encontram no fundo do mar no interior da área do Porto de Leixões, de outras formações ou estruturas litológicas importantes e para a identificação da profundidade do substrato rochoso.

O fundo hídrico na área do Porto de Leixões apresenta uma forte variabilidade lateral, sendo por isso inviável realizar extrapolações laterais com base apenas em dados de sondagens diretas ou semidiretas. A investigação geofísica é essencial para se conseguir a aquisição de uma secção contínua com uma elevada cobertura em termos de abrangência (Pacheco, 2014).

Por essa razão foi recomendável (tendo em conta a baixa profundidade das estruturas a investigar e a necessidade de detetar variações laterais), a utilização dos métodos de prospeção através de um sonar de varrimento lateral (SVL) e de reflexão sísmica de alta resolução (RSAR), levados a cabo em simultâneo (Pinheiro et al., 2011).

Através do sonar de varrimento lateral foi possível identificar e cartografar diversas estruturas superficiais, bem como todas as suas variações laterais, através da interpretação de uma fotografia acústica obtida com este equipamento. Através do método de reflexão sísmica de alta resolução foi possível determinar a espessura das diferentes camadas identificadas e seguir a sua continuidade espacial em profundidade, permitindo assim uma monitorização das variações laterais em profundidade dos diferentes tipos de formações geológicas que foram localizadas no fundo marinho (Pinheiro et al., 2011).

4.5.6.1. Metodologia, Processamento e Interpretação da Técnica de Investigação

Como já foi referido anteriormente, a campanha de prospeção indireta com recurso a um equipamento com sistema de sonar de varrimento lateral com CHIRP foi levada a cabo pela UA em 2009, a pedido da APDL. Foi uma campanha executada nestes moldes pois a área de estudo em causa encontrava-se submersa.

O conceito da empregabilidade da metodologia de reflexão sísmica num meio aquático tem como base o equipamento utilizado. Para efeitos de prospeção este tem de ter capacidade de gerar energia suficiente para atravessar a camada de água e as formações litológicas abaixo do fundo do mar.

O principal objetivo desta campanha foi o levantamento de dados por meio de um sonar de varrimento lateral com CHIRP, por este ser um equipamento mais completo e minucioso para recolha de dados nestas condições devido à necessidade de obtenção de imagens de alta resolução a baixas profundidades (Hatton et al., 1986).

Já a metodologia inerente à técnica de reflexão sísmica de alta resolução empregue para recolha de outros dados de investigação adotou os seguintes passos (Sheriff & Geldart, 1995):

- Criação de onda sísmica através do envio de um sinal acústico pela fonte;
- Amplificação do sinal recebido e filtragem primária do ruído;
- Gravação do sinal juntamente com sinais com tempo de alta precisão em formato digital (o sinal gravado é constituído em vários traços adjacentes – eventos sísmicos –, do qual cada um revela a evolução temporal e espacial das reflexões sísmicas geradas pelas diferentes interfaces litológicas em profundidade);
- Processamento do sinal gravado de modo a filtrar ruídos que tenham sido recolhidos preliminarmente à gravação e obter uma representação que facilite a sua interpretação.

O método de reflexão sísmica, representado na Figura 66, permite a conversão do sinal sísmico numa imagem suscetível de interpretação. Quando o sinal emitido pela fonte atinge uma interface onde há variação da impedância acústica, esse sinal é refletido e captado novamente à superfície

pelo recetor, formando uma imagem em TWT (do inglês “Two-way time” que significa tempo de ida e volta, ou tempo duplo) (Ashcroft, 2011).

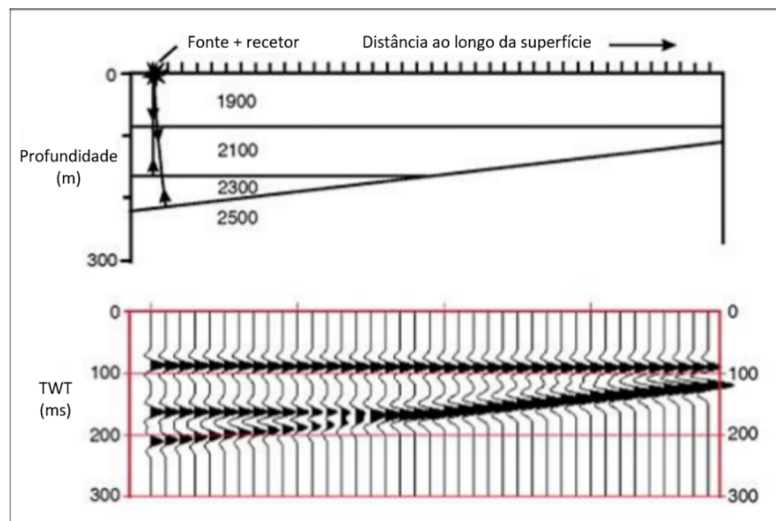


Figura 66 – Princípio de base do método de reflexão sísmica (Ashcroft, 2011).

Por outras palavras, o método consiste na emissão de um sinal sísmico a partir de uma fonte que, ao penetrar pela camada de sedimentos do fundo marinho, desenvolve-se até encontrar uma interface diferente do meio onde se inseriu. Atingida a interface, as velocidades de propagação das ondas sísmicas são obrigatoriamente alteradas devido à diferenciação das densidades dos materiais. Consequentemente, uma parte dessa energia será previsivelmente refratada devido a uma mudança abrupta na direção de propagação da mesma, mantendo-se esta ao longo da interface encontrada e emergindo em seguida de volta à superfície. A energia restante é imediatamente refletida em direção à superfície onde pode ser registada e posteriormente interpretada (Sheriff & Geldart, 1995).

Tendo em conta que a área em estudo tem uma profundidade reduzida, na implementação do método de reflexão sísmica a energia recebida foi essencialmente a refletida, visto que a energia refratada só retorna à superfície perante cenários de maiores distâncias entre a fonte e os recetores.

Na Figura 67 pode-se visualizar o decorrer de uma campanha de recolha de dados de prospeção, similar à que foi levada a cabo pela Universidade de Aveiro em 2009, que utilizou um sistema combinado de sonar de varrimento lateral com CHIRP sonar (Edgetech 512i) idêntico àquele que se encontra ao cuidado do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha do CESAM, da Universidade de Aveiro.



Figura 67 – Implementação do sistema de sonar CHIRP Edgetech 512i (Fonte: <http://www-udc.ig.utexas.edu/external/facilities/subbottom/>, consultado em junho de 2020).

Por fim, foram recolhidas as informações referentes aos resultados do estudo executado no local, e posteriormente organizadas e manipuladas convenientemente numa base de dados. Esta base de dados permitiu seleccionar as etapas posteriores a seguir de forma ponderada, nomeadamente na seleção dos parâmetros de avaliação dos outputs mais adequados a cada passo analítico empreendido (possibilitando diagnosticar possíveis problemas que possam vir a ocorrer, devido à parametrização indevida, por exemplo) e, por conseguinte, interpretar e ilustrar toda a informação recolhida. A criação desta base de dados permitiu expor toda a informação recolhida numa secção horizontal que representa coerentemente os horizontes geológicos presentes na subsuperfície terrestre daquela área (Yilmaz, 2001).

Uma das vantagens da utilização deste tipo de sistemas é que estes conseguem otimizar o balanço entre as resoluções vertical e horizontal e a penetração nos sedimentos, ou seja, em vez de enviarem um sinal de uma só frequência, enviam um sinal de frequência modulada, varrendo uma larga gama de frequências (Pinheiro et al., 2011).

No entanto, esses mesmos dados são adquiridos em formatos bastante ruidosos e o seu processamento e interpretação está dependente, em grande parte, das capacidades intelectuais e empíricas do intérprete (Hatton et al., 1986).

Outra das situações a ter em conta para efeitos da qualidade do processamento e interpretação de dados, são as características inerentes a cada sistema de investigação utilizado, principalmente a frequência de sonorização e a altura do “peixe” relativamente ao fundo aquático em estudo. Além disso, deve-se eventualmente proceder à repetição do envio do sinal emitido e ter em atenção a outros fatores como o comprimento do pulso, a largura da área abrangida pelo sonar e as condições meteo-marítimas presentes no meio aquático (Johnson & Helferty, 1990).

A Figura 68 ilustra a configuração geral de um sistema de reflexão sísmica de alta resolução a adquirir imagens para posterior processamento de dados.

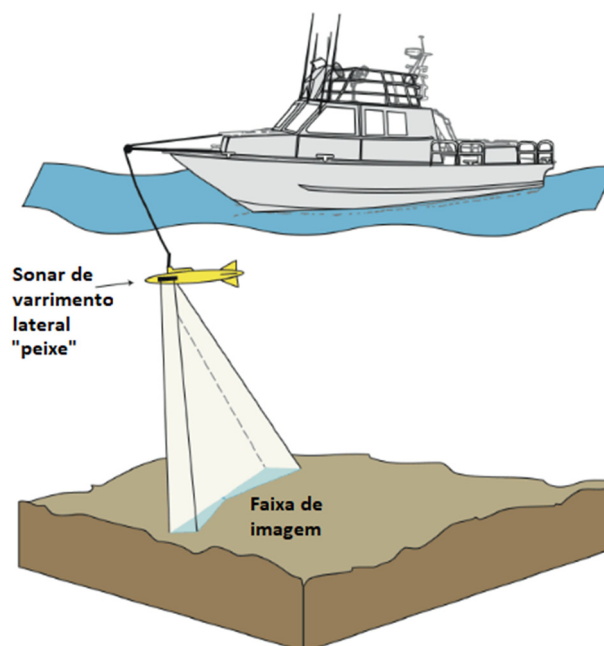


Figura 68 – Configuração geral de um sistema de reflexão sísmica de alta resolução (adaptado de: https://pubs.usgs.gov/pp/p1634/jf_scan.htm, consultado em junho de 2020).

4.5.6.2. *Análise e Interpretação dos Resultados da Campanha de Prospeção Efetuada pela Universidade de Aveiro*

Como consideração final acerca desta campanha realizada com recurso a um equipamento de sistema de sonar de varrimento lateral com CHIRP, deve-se dizer que a recolha e aquisição de dados decorrente desta prospeção não foram os expectados e isso teve repercussões ao nível da análise implementada nas fases seguintes a esta etapa de estudo, nomeadamente para efeitos de processamento e interpretação.

Os principais objetivos do estudo indireto seriam primeiramente observar e analisar as linhas sísmicas individualmente e posteriormente definir, em termos de perceção, o canal do rio Leça. Seguidamente seria avaliada a existência de possíveis contactos litológicos nessas mesmas linhas, assim como em todas as linhas de abrangência do estudo, e seria também feita uma comparação com os dados dos estudos semidiretos e diretos realizados anteriormente. Por fim, seriam definidos os limites para cada unidade litológica e seria também feita uma reapreciação mais plena da geologia da área do Porto de Leixões com base em todos os dados disponíveis.

As principais razões com um contributo expressivo para todo este enquadramento estiveram relacionadas com as características geológicas do local, particularmente devido à presença de múltiplas formações graníticas verticais e íngremes, resultantes de eventos geomorfológicos com milhares de anos. Outras causas consistiam na execução de constantes dragagens de modo a dar

resposta a todo o tipo de exigências que se requerem para a entrada e saída de elementos náuticos em segurança, o que desencadeou a alteração drástica da superfície coberta com sedimentos e cotas muito oscilantes. Estas razões levaram à realização da campanha de prospeção com bastante prudência.

A aquisição de dados foi obtida com uma frequência de 8 hertz, a uma velocidade superior a 4 nós, sendo que o espaçamento entre as linhas, ao longo dos quais se adquiriram os dados, foi de 100 a 140 metros (Pacheco, 2014).

Apesar das configurações estarem adequadas para a recolha dos dados de sonar de varrimento lateral, as mesmas não eram compatíveis quanto à recolha de dados por meio de formatação CHIRP, motivado pela recolha do sinal ter sido executado a uma velocidade mais elevada do que o desejável e também pelo facto do espaçamento entre as linhas de recolha ser muito extenso. Isto provocou a recolha de imagens com fraca resolução lateral e traços sem recuperação de qualquer informação útil. Ademais, a recolha de dados foi obtida com uma baixa razão entre sinal e ruído o que motivou bastante inquietação, dado que a presença de múltiplos na zona de interesse foi inevitável. Esse facto conduziu a que o processamento e interpretação desses mesmos dados fossem executados com muita dificuldade e em que, com alguma frequência, as imagens adquiridas não permitiram retirar ilações fiáveis.

Por todas as razões enumeradas, foram recolhidas ao longo de 12 linhas as respetivas secções sísmicas, representadas na Figura 69, das quais só 10 apresentavam qualidade suficiente para serem aproveitadas para efeitos de interpretação geotécnica (Pacheco, 2014).

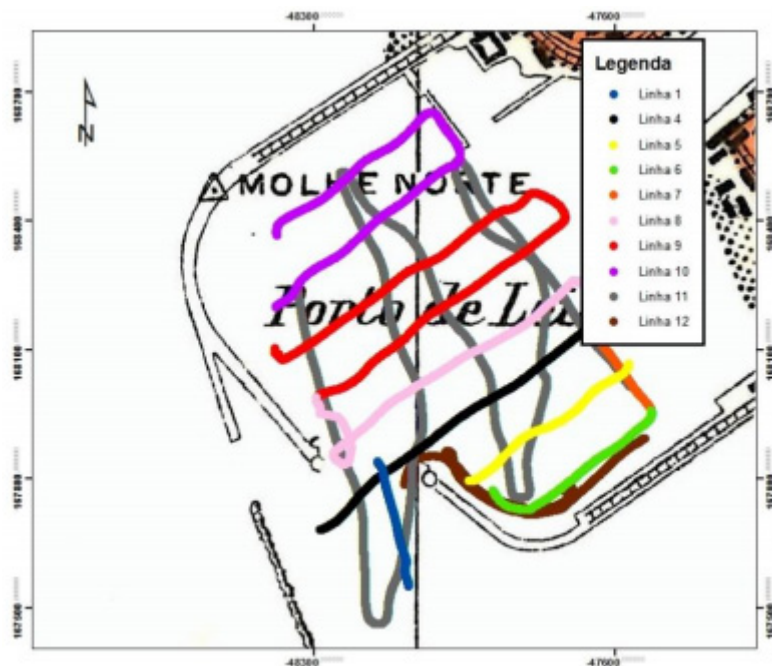


Figura 69 – Localização das linhas sísmicas da campanha de prospeção indireta (Pacheco, 2014).

Na Figura 70 pode-se observar a localização das linhas sísmicas que foram analisadas posteriormente, para efeitos de interpretação geotécnica, com base no posicionamento dos furos de sondagem referentes à campanha semidireta realizada previamente.

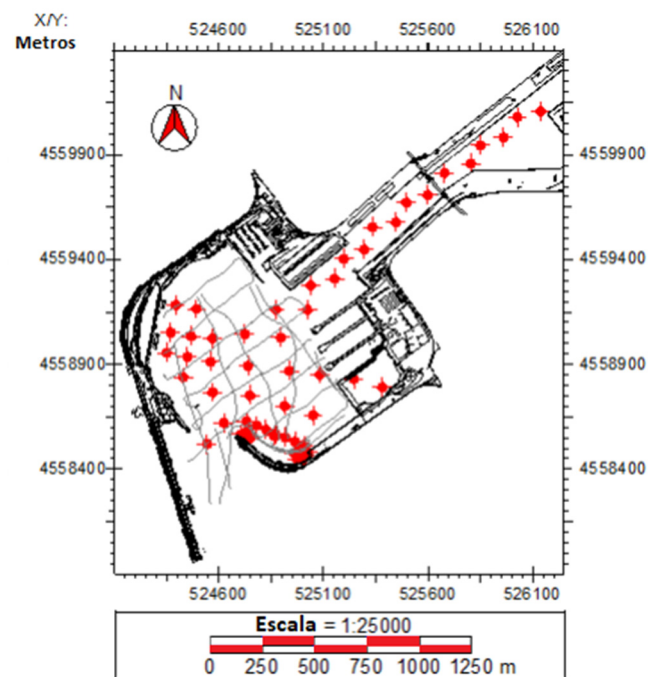


Figura 70 – Localização das linhas sísmicas com base no posicionamento dos furos de sondagem referentes à campanha de prospeção semidireta realizada previamente, em coordenadas UTM (Pacheco, 2014).

A Figura 71 demonstra uma porção da linha sísmica designada por “t8”, onde se pode constatar a ausência de informação em alguns traços, caracterizada pela presença de espaços em “branco”.



Figura 71 – Porção da linha sísmica “t8” (Pacheco, 2014).

O número de traços contidos em cada linha sísmica encontram-se de seguida, no Quadro 14.

Quadro 14 – Número de traços contidos em cada linha sísmica, em particular (Pacheco, 2014).

Linha	Nº de traços	Linha	Nº de traços	Linha	Nº de traços
0	1760	5	1597	10	3960
1	1099	6	1568	11	14483
2	1117	7	960	12	4634
3	242	8	3783		
4	2832	9	5759		

Após terem sido obtidas as imagens com as respetivas secções sísmicas, graças à aquisição de dados com o equipamento de sistema de sonar de varrimento lateral com CHIRP, procedeu-se à interpretação e ao processamento de toda a informação com recurso a dois *softwares*. O primeiro programa, designado por RadExPro, serviu para corrigir o ruído de *Swell* (filtro que serve para fazer a correção das ondulações que podem ocorrer no mar quando as condições não são favoráveis, principalmente as de índole meteorológica). O segundo, designado por SPW, destinava-se à deconvolução e à migração dos dados obtidos.

Como já foi referido, apenas dez perfis sísmicos apresentavam qualidade suficiente para serem aproveitados para efeitos de interpretação geotécnica após ter sido feito o seu devido processamento e integração (Pacheco, 2014).

Através da análise com recurso aos dois *softwares* já mencionados, conseguiu-se obter uma análise bem mais otimizada das secções sísmicas que foram avaliadas, o que permitiu uma melhor definição do *bedrock*, dos sedimentos e das unidades litológicas localizadas. Também proporcionou que fossem redefinidos os limites do contacto entre o granito e o micaxisto, bem como de outras estruturas rochosas, e com isso levar a cabo uma correlação em moldes muitos mais objetivos em termos de análise convergente com a Zona de Cisalhamento Porto-Tomar.

Após um estudo minucioso dos perfis sísmicos efetuados pela Universidade de Aveiro na área portuária de Leixões, Pacheco (2013) propõe uma interpretação geológica dos contactos entre os substratos rochosos identificados nesta região, i.e. micaxisto e granito do Porto. Esta interpretação pode ser consultada no Anexo X.

Por fim, deve-se dizer que apesar dos estudos de prospeção indireta serem complementares e indispensáveis na globalidade das campanhas de investigação que foram levadas a cabo, no caso da seleção do método da reflexão sísmica pôde-se constatar que um perfil sísmico nunca pode ser visto literalmente como uma secção geológica. Por isso, toda a complementaridade inerente a conhecimentos empíricos, bem como todos os conhecimentos de Geologia e Geofísica são cruciais para uma análise interpretativa em plenitude por parte do técnico de análise geológica. O mesmo deve ser capaz de identificar e eliminar todos os eventos provocados por ruídos e interferências e utilizar todos os conhecimentos geológicos adquiridos de modo a fazer a ligação entre a secção sísmica e o perfil geológico, preenchendo vazios de informação sempre que necessário.

Os contactos geológicos, por exemplo, só serão detetados se houver uma alteração significativa na impedância acústica das duas litologias. Por outro lado, quando os limites geológicos estão pouco espaçados existe a possibilidade da ocorrência de interferências que podem afetar a resposta sísmica e sugerir contactos geológicos que guiem o intérprete a uma conclusão incorreta (Stoker et al., 1997).

Em sumula, os materiais identificados dentro do perímetro portuário após as respetivas campanhas de prospeção implementadas por parte da Tecnasol, GEOMA e UA, foram o granito do Porto, o xisto luzente e aluviões lodosas de cor escura (espessuras entre 0,1 m e 4 m), por vezes ligeiramente arenosas e localmente com seixos subrolados ($D_{máx} = 2$ cm). Mais a sul, na área onde está instalado o Terminal de Cruzeiros, foram identificadas areias de grão fino, localmente lodosas.

Em referência ao granito do Porto, este caracterizou-se por ser um material bastante decomposto (W5) tendo já sido alvo de remoção quase na sua totalidade aquando das operações de rebaixamento do canal portuário implementadas pela APDL em 2006, em que a profundidade na zona foi definida em -12,00 m, relativamente ao ZHL.

Por fim, nas áreas onde ficam instalados o Porto de Pesca e o Terminal Multiusos, foram identificados materiais graníticos de grão médio, por vezes com textura gnáissica, de tons cremes acinzentados ou acastanhados e com duas micas. Este material foi igualmente removido após as mesmas operações de rebaixamento de 2006 mencionadas supra, tendo esta zona passado a ter uma profundidade definida à cota -11,00 m (ZHL) (Silva, 2018).

4.5.6.3. Descrição dos Resultados da Campanha de Prospeção Efetuada pela GEOSUB

Em 2017 foram empreendidas campanhas de prospeção geofísica por parte da GEOSUB – Prospeção, Geomática e Ambiente, Lda., adstritos pela APDL e com vista à execução de serviços de investigação geofísica, particularmente no que diz respeito ao âmbito de estudo da presente dissertação, de caracterização físico-química de sedimentos e de caracterização tridimensional da área portuária interior e envolvente.

O principal objetivo deste estudo foi a investigação e a descrição do estado dos fundos aquáticos do Porto de Leixões à data numa perspetiva geomorfológica, ou seja, de forma a examinar, aferir e definir algumas das propriedades base deste território marinho. Mais particularmente, as propriedades estudadas foram a espessura dos sedimentos existentes associados a depósitos areno-lodosos, a cota do substrato rochoso subjacente aos depósitos sedimentares e a demarcação de todos os afloramentos rochosos existentes, não só dentro do perímetro portuário como adjacentes ao mesmo. Além disso, esta campanha teria também como desígnio a execução de uma análise precisa de forma a caracterizar as estruturas existentes nesse mesmo território. Verificou-

se que o estrato aluvionar pode atingir os 13 m de espessura em algumas regiões próximas à infraestrutura portuária (Geosub, 2017)

As técnicas utilizadas nesta expedição geológica foram o método de reflexão sísmica ligeira e as metodologias de sonar de varrimento lateral e de magnetometria. Estas atividades foram desenvolvidas dentro do perímetro portuário de Leixões abrangendo também as áreas correspondentes à Bacia de Manobras, à extensão entre o Molhe Norte e o Molhe Sul, bem como ao espaço exterior de acesso ao Porto de Leixões, como se pode ver na Figura 72 (Geosub, 2017).



Figura 72 – Extensão total da superfície, ilustrada a violeta, sobre a qual incidiu o estudo geofísico adstrito pela APDL (Geosub, 2017).

Após a execução dos trabalhos de reconhecimento levados a cabo na área pré-definida para a implementação deste estudo, e após a devida apreciação crítica de todos os ensaios geofísicos efetuados inferiu-se que, em termos orográficos, a superfície sobre a qual incidiu o estudo geofísico apresenta fundos bastante regulares e pouco variados. Contudo, na zona mais a norte da bacia portuária é notória a presença de alguns socalcos resultantes de anteriores campanhas de dragagem.

O método de reflexão sísmica permitiu igualmente captar a presença de afloramentos rochosos no segmento a sul da infraestrutura portuária e numa zona ulterior ao Molhe Norte e Molhe Sul.

Por fim, também com a implementação da técnica de sonar de varrimento lateral e com a recolha de dados após a concretização do estudo magnetométrico, conseguiu-se adquirir informação importante e elementar relativamente à superfície dos fundos desta infraestrutura marítima. Esta informação propiciou o assinalamento de várias zonas dissemelhantes, nomeadamente áreas de cobertura sedimentar, áreas de enrocamentos e áreas de afloramentos rochosos. Ressalvar também que este último trecho de afloração rochosa ficou demarcado especificamente já na parte exterior da infraestrutura portuária de Leixões.

4.5.7. *Descrição do Estudo Efetuado pela Consulmar – Requalificação das Acessibilidades Marítimas*

Em 2006 foi realizada a primeira grande intervenção respeitante à melhoria das acessibilidades marítimas com o estabelecimento da Bacia de Rotação e do Canal de Acesso à Doca nº 4 à cota -12,00 m (ZHL). A execução desta obra foi feita preliminarmente por via da dragagem dos sedimentos presentes na área respeitante à empreitada a decorrer, de forma a desguarnecer o maciço tendo sido aproveitada uma parte desse material para alimentação artificial das praias adjacentes.

De seguida procedeu-se ao desmonte do maciço rochoso até à cota definida em projeto (-12,00 m ZHL). Após terem sido efetuados os respetivos ensaios laboratoriais para análise das características e propriedades do conteúdo rochoso desmontado concluiu-se que o mesmo se caracterizava por apresentar um grau de alteração de nível alterado (W3), com um grau de fraturação equivalente a F4 (fraturas próximas) (ISRM, 1981).

Já em 2017, no âmbito da componente de requalificação das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões e após um estudo levado a cabo pela Consulmar, definiu-se o futuro estabelecimento da Bacia de Rotação à cota de -15,50 m (ZHL) e o estabelecimento de um canal de acesso exterior à cota de -16,85 m (ZHL). Estas novas cotas foram definidas em detrimento das antigas que se situavam entre -17,00 m e -13,00 m (ZHL) relativamente à Bacia de Rotação e entre -12,00 m e -10,00 m (ZHL) relativamente ao canal de acesso exterior. O estudo realizado pela Consulmar assentava inicialmente na caracterização da área de intervenção e posteriormente na descrição das infraestruturas portuárias integradas na bacia portuária, assim como numa caracterização preambular das condições naturais do Porto de Leixões.

Com a consecução desta influente obra aferiu-se que no total seriam precisos dragar três milhões de metros cúbicos de material rochoso e de material incoerente, numa proporção de 60% relativamente à fração de material rochoso e de 40% no que diz respeito à quantidade de material incoerente (Consulmar, 2017).

No que tange à quantidade de material incoerente (40%), esta composição foi dividida em duas variedades de categorias. Os agregados da categoria 1 (areias e seixos) formavam aproximadamente 158 000 m³ e foram posteriormente utilizados para alimentação da deriva litoral a Sul do Porto de Leixões. Este material será dragado com recurso a uma draga de sucção. Já os agregados da categoria 2 (argilas e siltes) formavam aproximadamente 1 028 000 m³ de material em referência ao volume total de material incoerente. Estes serão igualmente dragados por meio de uma draga de sucção. No que diz respeito à porção de material rochoso (60%), este em termos numéricos correspondia a cerca de 1 800 000 m³ de material. O material rochoso será desmontado

utilizando uma draga de corte e sucção para reduzir riscos e impactes ambientais associados às vibrações do desmonte a fogo.

Determinou-se que do volume total de material rochoso desmontado, 20% iria ser reutilizado para a implementação do núcleo na futura obra de extensão e requalificação do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (Silva, 2018).

Sendo assim, durante a dragagem para extração do material desmontado, este será depositado no porão de um batelão próprio para este tipo de operações. Posteriormente será feita uma seleção acurada do volume de agregado nas condições requerentes para o mesmo poder ser utilizado na execução do núcleo respeitante à extensão do futuro Molhe Norte. Estima-se que o volume de material que irá ser empregue na execução desse elemento corresponda aproximadamente a cerca de 350 000 m³ de agregado rochoso (Consulmar/Nemus, 2018).

No seguinte Quadro 15 pode-se visualizar e consultar a quantidade total de material que será desmontado, e posteriormente dragado, com as referências equivalentes a cada porção percentual e numérica atinente a cada tipo de material.

Quadro 15 – Classe de material dragado e respetivas quantidades (adaptado de Consulmar, 2017; Silva, 2018).

MATERIAL		VOLUME DRAGADO (m3)	PERCENTAGEM TOTAL (%)
INCOERENTE	Finos (siltes e argilas)	1 028 000	5
	Grosseiro (areias e seixos)	158 000	35
	SUBTOTAL	1 186 000	40
ROCHOSO	Reaproveitável	364 000	12
	Não Reaproveitável	1 445 000	48
	SUBTOTAL	1 809 000	60
TOTAL		2 995 000	100

4.5.8. Síntese dos Resultados Obtidos nas Campanhas de Prospeção

De seguida é apresentada uma síntese de toda a informação relativa aos métodos utilizados e resultados obtidos nas campanhas de prospeção analisadas previamente.

Os métodos utilizados nas campanhas de prospeção direta e semidireta realizadas pela Tecnasol, Geoma e Argonvia são os que se seguem:

- Tecnasol: sondagens à percussão e rotação com recolha de amostras;
- Geoma: sondagens à rotação com carotagem;
- Argonvia: sondagens à rotação por transmissão hidráulica com recolha de amostras e acompanhadas por ensaios SPT.

Os métodos utilizados nas campanhas de prospeção indireta pela UA e Geosub são os seguintes:

- Universidade de Aveiro: sistema de reflexão sísmica de alta resolução com recurso a um sonar de varrimento lateral com CHIRP;

-
- Geosub: reflexão sísmica ligeira com recurso a um sonar de varrimento lateral, e magnetometria.

Na globalidade das campanhas de prospeção direta e semidireta foi detetado um maciço xistento, gnaissico ou migmatítico, pertencente ao Complexo Xisto-Grauváquico. Este maciço apresenta-se medianamente a muito alterado (W3-4) e fraturado (F3-4 e F4-5) na zona mais superficial. Em profundidade, este maciço apresenta-se medianamente alterado (W2-3) e medianamente a muito fraturado (F3-4).

O granito observado em 9 das 39 sondagens efetuadas pela Tecnasol em 2004 não foi observado na campanha da Argonvia realizada em 2018. Na campanha efetuada pela Geoma, em 2009, este maciço foi apenas observado junto ao canal de acesso à Bacia de Rotação, em 3 das 20 sondagens efetuadas por esta empresa. É possível que não se tenha encontrado granito na campanha de prospeção da Argonvia por esta ter incidido apenas na Bacia de Rotação do Porto de Leixões. Na campanha da Tecnasol a maioria das sondagens que atingiram este maciço foram efetuadas nos canais de acesso às docas do porto. Outra possível justificação de não se ter observado granito em 2018 é resultado do aprofundamento dos fundos da Bacia de Rotação e do Canal de Acesso à Doca nº 4 em 2006. Esta intervenção incluiu dragagens de sedimentos e desmontes de material rochoso que alteraram o substrato rochoso granítico observado na campanha efetuada pela Tecnasol em 2004.

Na interface entre o substrato rochoso e as aluviões foram detetados solos residuais compactos ($N_{SPT} > 30$) e maciço rochoso decomposto (W4-5).

Adicionalmente, existe unanimidade quanto às aluviões que cobrem os substratos rochosos do Porto de Leixões. Estas formações apresentam características arenosas, silto-argilosas e lodosas consoante a profundidade (aluviões lodosas à superfície; aluviões arenosas em profundidade). A campanha de prospeção geofísica realizada pela Geosub indica que no local da futura obra, as aluviões apresentam uma espessura que pode variar entre os 4 m e 13 m, aproximadamente.

No local onde se vai realizar a obra de prolongamento do quebra-mar exterior os fundos consistem em aluviões principalmente lodosas, solos residuais compactos com um substrato rochoso xistento, gnaissico ou migmatítico medianamente alterado e fraturado.

É importante referir que as sondagens realizadas pela Argonvia atingiram uma profundidade máxima de 7,7 m, correspondente a cotas rondando os -18,0 m (ZHL). Portanto, se existe maciço rochoso granítico no local de obra (não aflorante), é provável que surja por volta desta cota.

A Geosub constata que na zona a Sul da infraestrutura portuária, exterior aos molhes, foram detetados expressivos afloramentos rochosos que poderão encontrar-se associados a destroços de naufrágios do séc. XX já devidamente assinalados (Geosub, 2017).

4.6. Quebra-mar Exterior do Porto de Leixões

Analisados os processos de pré-dimensionamento e construção de um quebra-mar de taludes convencional no capítulo relativo ao estado da arte (ver subcapítulo 3.3. “Quebra-mar de Taludes”), será agora retratado o caso específico do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

Inicialmente será descrito o dimensionamento dos mantos resistentes, seguido dos temas relacionados com a fase de construção, programação temporal e manutenção da estrutura de proteção de Leixões.

4.6.1. Dimensionamento dos Mantos Resistentes

O projeto de dimensionamento dos mantos resistentes foi sustentado em três fatores preponderantes para a vida útil da estrutura no futuro:

- Onda de dimensionamento;
- Peso dos elementos do manto resistente;
- Densidade de disposição dos blocos Antifer.

A definição da altura da onda de projeto teve por base alguns estudos antecedentes de investigação em modelo físico reduzido, bem como outros estudos complementares ao dimensionamento da estrutura, particularmente sobre a agitação marítima prevalecente na superfície marítima de implantação da obra. Esta antevê que, na proximidade da risberma e para um período de retorno $T = 100$ anos, tendo em conta o nível de maré médio com uma direção atuante no sentido oeste (de onde se formam alturas de onda maiores), a altura de onda de projeto seja na ordem dos 8,6 m, aproximadamente (Consulmar/Nemus, 2018).

Por isso, tendo em conta a relevância e o custo económico da obra, foi deliberado para efeitos de dimensionamento que a estrutura fosse construída tendo em conta ações substancialmente mais desfavoráveis do que aquelas a que a mesma estará efetivamente sujeita durante o seu período de vida útil, dentro de um propósito mais conservativo. Sendo assim, após a aplicação de um fator de segurança $FS = 1,27$ para uma altura de onda de $H_s = 8,6$ m, o manto de proteção será dimensionado utilizando um critério mais conservativo: $H_{1/10} = FS \times H_s \cong 11,0$ m.

Para o cálculo do peso dos elementos do manto resistente foi usado o método de Hudson (1959), em que foi avaliado e ponderado o peso volúmico do material dos cubos e da água do mar. Recorreu-se também à utilização de um coeficiente relativo, correlacionado com o tipo de elementos do manto e arrumação, tendo-se obtido os seguintes resultados, apresentados no Quadro 16, após a conjugação destes dois critérios.

Quadro 16 – Valores do dimensionamento do manto resistente (Consulmar/Nemus, 2018).

Inc. talude	TRONCO			CABEÇA		
	Peso (kN)	Volume (m ³)	Densidade (kN/m ³)	Peso (kN)	Volume (m ³)	Densidade (kN/m ³)
1 / 2,0	680	25	27.2	800	25	32

Após testes de ensaios bidimensionais e tridimensionais realizados pelo LNEC, em que foi determinada a densidade para a distribuição dos blocos Antifer, a superfície do talude, o número de camadas de revestimento do manto, a porosidade, o peso específico do material dos blocos e o peso de um bloco, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 – Densidade de distribuição dos blocos Antifer (Consulmar/Nemus, 2018).

Perfil	Densidade (unid./100 m ²)
Talude do tronco (blocos de 680 kN)	14
Talude da cabeça (blocos de 680 kN)	15
Talude no intradorso do tronco (blocos de 680 kN)	9
Pé de talude, extradorso e na rotação da cabeça (blocos de 800 kN)	18,5

4.6.2. Fase de Construção

4.6.2.1. Áreas Abrangidas pela Empreitada

Durante a fase de construção decorrente da extensão do quebra-mar exterior de Leixões serão afetadas algumas zonas específicas, tanto direta como indiretamente, bem como todas as acessibilidades interligadas à estrutura portuária nos mesmos moldes.

Segundo o EIA, antevê-se que com esta empreitada seja afetada de forma direta, não só a área total correspondente à área de construção do prolongamento do quebra-mar exterior, bem como todas as áreas adjacentes utilizadas para incorporar as estruturas provisórias de apoio à construção, nomeadamente plataformas de trabalho necessárias à operação de gruas e outros equipamentos pesados, estaleiro(s) de apoio à obra, áreas de “stockagem” de materiais (por exemplo de enrocamentos) e/ou de fabricação de outras componentes como elementos de blocos de betão. (Consulmar/Nemus, 2018).

Também, como referido anteriormente, todas as acessibilidades interligadas à estrutura portuária de forma direta ou indiretamente serão afetadas, nomeadamente o acesso principal à infraestrutura portuária através da Via Interna de Ligação ao Porto de Leixões (VILPL), interligada à Via Regional Interna (VRI), que se ramifica com dois acessos prioritários na logística deste Porto – a A41 junto ao Aeroporto Francisco Sá Carneiro e a A4 em Custóias. Dentro da infraestrutura marítima será afetada também a Via de Cintura Portuária (VCP) que serve de ligação a todos os vários terminais existentes no Porto de Leixões.

Todos os trabalhos interligados à empreitada em causa devem, no entanto, transcorrer sem afetar a operacionalidade portuária de todo (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.2. *Estaleiros e Estruturas Provisórias de Apoio à Obra*

Preliminarmente a qualquer tipo de empreitada de uma certa envergadura, deve-se proceder à montagem do estaleiro, convencionalmente composto por escritórios, instalações sociais e oficinas. Devem-se levar a cabo as respetivas ações de mobilização e montagem de todos os equipamentos necessários para a implementação da obra em causa nas áreas concedidas pelo dono de obra.

Relativamente à obra em estudo, respeitante à extensão da estrutura de proteção atual a norte do Porto de Leixões, a mesma requer de áreas destinadas para o estaleiro de obra e oficinas, de zonas adjacentes para implementação e montagem de outro tipo de instalações complementares, nomeadamente de locais destinados à pré-fabricação de blocos artificiais e de áreas de armazenamento para blocos artificiais ou de cais de carga de enrocamentos.

Ficou igualmente definido que o estaleiro a implementar para esta obra ficará situado na área norte do Porto de Leixões, relativamente próximo à zona de encurvadura da estrutura de proteção localizada no mesmo local. Ficarão, por isso, num local contíguo a outra área habitualmente utilizada nas empreitadas de recarga ou substituição de tetrápodes do atual manto do quebra-mar exterior, como a que esteve em curso em 2017.

Essa área adjacente servirá agora como local de apoio à construção e extensão do molhe norte e será nesta zona que serão fabricados os blocos artificiais em betão (tipo Antifer) que irão constituir o manto de proteção do futuro extremo do quebra-mar exterior (Consulmar/Nemus, 2018).

Suplementarmente, também será criada uma área de “stockagem” de enrocamentos na zona do terminal cimenteiro localizado a sul do Porto de Leixões. Este material será transportado por via marítima a partir daí, através de batelões com abertura pelo fundo e posteriormente descarregados no local preciso da frente de empreitada. O acesso a este local é feito exclusivamente pela VILPL e posteriormente pela VCP.

O material de enrocamento que não seja viável de transportar através de batelões será orientado e transposto por via terrestre até à frente de obra da estrutura de proteção (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.3. *Metodologia Construtiva e Principais Operações*

Os principais procedimentos construtivos a implementar serão, de um modo geral, os seguintes (Consulmar/Nemus, 2018):

- Ações preliminares de logística, associadas à empreitada e ao funcionamento das estruturas de apoio, nomeadamente a montagem e funcionamento dos estaleiros e de

outras infraestruturas de apoio à obra, bem como a movimentação geral de veículos, de maquinaria e equipamentos e de operadores envolvidos no processo construtivo;

- Pré-fabricação dos blocos de betão para os mantos de proteção;
- Demolição da atual cabeça do quebra-mar;
- Colocação dos enrocamentos do núcleo;
- Colocação dos enrocamentos do submanto;
- Colocação dos blocos de betão do manto de proteção;
- Execução da cabeça de inverno provisória;
- Execução do maciço de coroamento;
- Limpeza, desmobilização e desmontagem do estaleiro, que engloba as ações de desmontagem dos estaleiros, a remoção de estruturas provisórias, a limpeza geral de todas as zonas associadas direta ou indiretamente à empreitada e os trabalhos de reposição e melhoria dos locais, para que os mesmos retornem ao estado inicial antes do início da implementação da obra.

Além disso, na estruturação do Plano de Trabalhos da Empreitada, o empreiteiro deve preliminarmente ponderar todos os parâmetros que possam condicionar a execução dos mesmos, nomeadamente certos fatores que possam condicionar, de certo modo, a normal atividade portuária, particularmente ao nível da navegação ou flutuação de embarcações.

Vão ser feitas dragagens de areia e, tendo em conta as cotas do projeto, vai ser necessário fazer desmonte de rocha. As operações de dragagem devem ser realizadas em paralelo à construção do quebra-mar para que se possam utilizar os materiais obtidos como apoio à obra.

No entanto, existem igualmente outras condicionantes que merecem especial atenção para que se evitem constrangimentos no decorrer dos trabalhos, designadamente o clima de agitação marítimo, outras possíveis condicionantes meteorológicas, ambientais, de segurança ou geotécnicas e, finalmente, outras operações portuárias a decorrer nas imediações dos trabalhos de empreitada.

Ademais, as autoridades portuárias competentes deverão validar e colocar em prática um plano de balizamento e assinalamento marítimo provisório durante a fase de construção para evitar outros inconvenientes no tráfego marítimo. Ainda assim, segundo a APDL, não se prevê que haja qualquer tipo de constrangimento relevante que ponha em causa o normal funcionamento do Porto de Leixões mas, no entanto, impõe-se a necessidade de regular e coordenar todas as atividades de construção a desenvolver em articulação com o planeamento diário da atividade portuária. Terá que haver, por isso, um delineamento concertado de todas estas atividades conjuntas entre o empreiteiro e a DOPS da APDL, de forma a evitar qualquer contratempo (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4. Principais Procedimentos Construtivos a Adotar na Obra

Em seguida será abordado com maior detalhe os principais procedimentos construtivos a adotar na empreitada, bem como todos os métodos de execução dos mesmos, tendo em conta todos os requisitos técnicos em articulação com os prazos recomendados a constar no caderno de encargos. Todos estes trabalhos deverão transcorrer sem afetar a funcionalidade e a operacionalidade portuária, devendo ser ponderadas todas as limitações evidentes relacionadas com o acesso ao molhe abrangidas no cenário de obra, perfazendo assim com que se privilegiem essencialmente as soluções construtivas executadas por via marítima (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.1. Pré-fabricação dos Blocos de Betão

Na empreitada para a extensão do quebra-mar exterior serão empregues e distribuídos blocos de betão cúbicos do tipo Antifer para a constituição de toda a secção do manto resistente, sendo que os pesos dos mesmos variam entre os 680 kN e os 800 kN, dependendo do segmento onde serão colocados na nova estrutura.

A fabricação de blocos será inicializada previamente à colocação de enrocamentos de forma a criar em obra um *stock* de elementos que permita a continuidade da sua colocação sem condicionantes (Consulmar/Nemus, 2018).

A altura dos blocos de betão será de aproximadamente 2,9 metros, e os mesmos serão pré-fabricados no estaleiro de obra, onde será utilizado betão-pronto produzido numa central fixa fora da estrutura portuária e fornecido posteriormente através de autobetoneiras com capacidade média para um volume de material de 8 m³. O betão-pronto será depois vertido a partir dos camiões-betoneira para moldes próprios, onde permanecerá até adquirir a presa e a forma própria do elemento.

Após a descofragem dos blocos, estes deverão permanecer na eira de pré-fabricação até que decorra o prazo de cura previsto (normalmente cerca de 30 dias) para que a sua movimentação possa ser efetuada sem constrangimentos, desde esse local até as zonas de armazenamento, onde ficarão até à altura da sua colocação. A movimentação dos blocos de betão será efetuada com recurso a gruas e o seu transporte operado através de camiões próprios com plataforma plana.

Para esta obra está estipulada a pré-fabricação de cerca de 5 000 blocos, estimando-se um prazo de 15 meses para a sua execução completa (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.2. Colocação dos Enrocamentos do Núcleo

Posteriormente à demolição da atual cabeça do quebra-mar é dado início à colocação e distribuição dos enrocamentos do tipo TOT na zona núcleo da estrutura. Este processo é executado por duas vias, sendo necessariamente dada prioridade à execução desta operação por via marítima em detrimento das ações construtivas implementadas por via terrestre, de forma a minimizar o

número de passagens de camiões de transporte nas vias que dão acesso ao quebra-mar exterior. Os materiais provenientes de dragagens que ocorrerão em paralelo podem servir de apoio ao enchimento do núcleo do quebra-mar.

Será também integrada na área portuária uma eira de “stockagem” de enrocamentos, precisamente na área do terminal cimenteiro na zona sul do porto de Leixões, para que este material possa ser carregado a partir desse local em batelões autopropulsionados, equipados com gruas com abertura pelo fundo, e assim descarregado mais facilmente no local de obra por via marítima.

O volume de material de enrocamento que não se consiga processar desta forma (transporte por via marítima até a frente de obra) será transportado por via terrestre em camiões e colocado diretamente na frente de empreitada. O seu posicionamento será retificado por equipamentos de apoio à obra, essencialmente escavadoras ou gruas.

Como referido anteriormente, a colocação e distribuição dos enrocamentos do tipo TOT é executada por secções a partir do núcleo da estrutura, de modo a que, seguidamente, sejam iniciados os trabalhos de colocação dos submantos da forma mais célere possível, para que este setor esteja minimamente exposto à agitação marítima.

A colocação e distribuição do material de enrocamento do tipo ToT deverá ainda ser complementado por controlos batimétricos, sendo que os mesmos deverão ser efetuados sempre antes do início da colocação dos mantos subsequentes.

O prazo para a consecução da execução do núcleo e de outras operações complementares a executar nesta fase terá uma duração aproximada de oito meses (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.3. Colocação dos Enrocamentos dos Sub-mantos

Após a devida colocação e distribuição dos enrocamentos do tipo TOT pelo núcleo da estrutura, será levado a cabo o mesmo processo para a constituição do submanto de enrocamento da estrutura de proteção. Com esta fase pretende-se reduzir a exposição da superfície do núcleo à agitação marítima, devendo esta operação ser implementada o mais brevemente possível para minorar os efeitos desfavoráveis interligado a este fenómeno meteo-marítimo e assim assegurar o equilíbrio dos taludes que integram a estrutura de proteção (Consulmar/Nemus, 2018).

O volume de material de enrocamento que está previsto colocar e distribuir nos submantos é de cerca de 210 000 m³, sendo que este processo será implementado por duas vias:

- Via marítima: recorrendo à utilização de pontões flutuantes equipados com gruas, ou com retroescavadoras hidráulicas, que irão partir desde a área onde o material será carregado para transporte (zona de “stockagem” na margem sul do Porto de Leixões) até ao local onde a obra será erigida. Está prevista a utilização de um único batelão autopropulsionado com

uma capacidade de porão de 600 m³, tal como referido anteriormente, e que deverá fazer duas viagens por dia, para um total de 350 viagens;

- Via terrestre: o material de enrocamento será transportado por camiões até à frente de obra, sendo depois movimentado e distribuído através de gruas ou retroescavadoras posicionadas sobre o núcleo da estrutura.

O prazo para a consecução das operações a executar nesta fase terá uma duração aproximada de sete meses (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.4. Colocação dos Blocos de Betão do Manto de Proteção

Ulteriormente a ser executada a operação de colocação e distribuição de enrocamento no submanto da estrutura, e de se proceder à verificação topográfica da geometria deste setor, prosseguir-se-á seguidamente com as operações de colocação e distribuição de blocos Antifer no manto resistente localizado sobre o talude de enrocamentos previamente executado, e sobre o qual assentarão os elementos de betão.

Esta operação será implementada por via terrestre e executada a partir do coroamento do quebra-mar por via de gruas sobre rastos. Os elementos serão colocados e distribuídos de acordo com uma malha definida preliminarmente para a implementação desta operação, sendo que a colocação da mesma deve ser verificada por sistemas de georreferenciação. As operações de colocação e distribuição de blocos na parte imersa dos taludes serão acompanhadas e complementadas por equipas de mergulho.

O prazo para a consecução das operações a executar nesta fase, para uma previsão de um rendimento médio de colocação diária de 30 blocos/dia, terá uma duração aproximada de sete meses (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.5. Execução da Cabeça de Inverno Provisória

O prolongamento do quebra-mar exterior prevê a execução de uma cabeça de inverno provisória, como é o caso de qualquer projeto de dimensionamento de uma estrutura de proteção desta magnitude, pois, neste género de obras, a conclusão dos trabalhos prolongam-se habitualmente por períodos de mais que do que um verão marítimo. Por essa razão é recomendado que as operações de obra sejam suspensas, nestes contextos, durante o período de inverno devido à severidade da agitação marítima. Como tal, torna-se necessário implementar uma cabeça de inverno provisória para proteção da frente de trabalho.

Os materiais a utilizar provisoriamente neste tipo de elementos devem ser, convencionalmente, blocos em betão devidamente dimensionados para que subsistam à ondulação prevista durante o período de inverno, devendo ser retirados e posteriormente reutilizados nos mantos de proteção do prolongamento do quebra-mar exterior (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.4.6. *Execução do Maciço de Coroamento*

O último estágio da empreitada de implementação do prolongamento do molhe norte consiste na execução do maciço de coroamento, que não é mais que uma superestrutura constituída em betão simples localizada na secção superior da estrutura de proteção. A implementação do maciço de coroamento é executada através de betonagem por secções com início na cabeça do quebra-mar e recuando até ao seu enraizamento. A betonagem será executada por descarga direta dos camiões autobetoneira, contra o enrocamento existente no fundo e lateralmente suportado por cofragens complementares.

O prazo para a consecução das operações a executar nesta fase será de aproximadamente 3 meses (Consulmar/Nemus, 2018).

4.6.2.5. *Programação Temporal*

A empreitada de requalificação e extensão do quebra-mar exterior do Porto de Leixões prevê um período temporal de 30 meses para a execução de todos os processos construtivos, desde a montagem do estaleiro até à conclusão de todas as operações essenciais. Previamente o prazo de execução estava definido para 24 meses, porém, por decisão da APDL, este prazo foi prolongado para 30 meses devido às condições adversas do inverno na costa portuguesa. Para este tipo de obras marítimas, as melhores condições são observadas no verão.

Para além das operações referenciadas anteriormente estão igualmente incluídas as operações de colocação e distribuição dos enrocamentos e de outros elementos de betão pelos vários setores da nova estrutura implementada. As operações de maior complexidade serão particularmente executadas no período de verão marítimo (dos meses de abril a outubro), de forma a tirar partido de condições meteo-marítimas mais favoráveis, estando assim previsto para realização destas operações em particular um espaço temporal de dois verões marítimos consecutivos para a consecução das mesmas, dentro do prazo global da obra. Desta forma, descontam-se os principais meses da estação de inverno devido à potencial influência negativa que as condições meteorológicas, previsivelmente desfavoráveis e características desta estância temporal, possam propiciar durante a realização da obra.

Contudo, a pré-fabricação dos blocos de betão para o manto de proteção não será suspensa durante a estação de inverno, desenvolvendo-se continuamente entre os meses 3 e 17, dentro do período temporal total de 30 meses. Em princípio, a empreitada do prolongamento do quebra-mar exterior será encetada durante o mês de janeiro, ou seja, três meses antes do primeiro verão marítimo. Este período servirá para a montagem do estaleiro e mobilização dos equipamentos de apoio à obra de forma a assegurar um *stock* de blocos suficiente para colocação durante a segunda etapa de trabalhos marítimos. Prevê-se igualmente que o empreiteiro labore sensivelmente 10

horas diárias, durante o período diurno e durante 6 dias por semana, de segunda-feira a sábado respectivamente.

Por fim, e em consequência de todos os fatores externos inerentes às características desta obra em especial (condições meteorológicas, marés, operacionalidade do próprio Posto A), serão consentidos desvios de prazos para a total consecução da empreitada até um máximo de 1 mês (Consulmar/Nemus, 2018).

Segundo informação por parte da APDL, prevê-se que o início da obra esteja marcado para o segundo semestre do ano 2021.

4.6.2.6. *Manutenção da Estrutura de Proteção*

Em síntese, após a consecução da empreitada de prolongamento do quebra-mar exterior e considerando que a estrutura foi dimensionada de forma conservadora para um período de retorno de 100 anos, prevê-se que a necessidade de intervenções de manutenção durante a vida útil desta estrutura sejam muito reduzidas no futuro.

Este tipo de operações de manutenção, quando necessárias, são fundamentalmente intervenções de substituição/reposição dos blocos artificiais em betão (tipo Antifer) que integram a secção do manto de proteção da empreitada da estrutura de proteção costeira. Este tipo de atividades de manutenção e reabilitação já vêm a ocorrer atualmente na restante extensão do molhe, dentro dos mesmos moldes. Porém, a reposição dos blocos artificiais em betão é atualmente implementada, na estrutura já existente, com blocos de tetrápodes e não do tipo Antifer.

Por fim, atendendo ao previsível caráter excepcional, e muito pontual, que se antevê para com este tipo de intervenções, estas deverão ser executadas apenas quando inevitáveis, de forma programada e por via marítima, aproveitando períodos de fraca agitação oceânica. Em ações desta natureza é recomendando a utilização de pontões, do tipo *jack-up*, evitando-se assim a utilização de acessos por via terrestre. Este equipamento, representado na Figura 73, pode ser utilizado na reabilitação de estruturas costeiras.



Figura 73 – Imagem de um pontão do tipo “jack-up” utilizado na reabilitação de estruturas costeiras (Fonte: <https://www.workboatsales.com/vessel/24m-modular-jack-up-pontoon-for-sale-or-charter/>, consultado em outubro de 2019).

(página propositadamente em branco)

Capítulo V

Conclusões

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões

5.1. Considerações Conclusivas

A APDL decidiu empreender um conjunto de propostas com vista a uma requalificação extensiva de alguns setores chave inseridos na sua jurisdição, de forma a consolidar todo o seu crescimento exponencial inerente às últimas décadas e para manter a sua consistência competitiva no plano portuário nacional e internacional. Os dois projetos que estão previstos serem implementados atualmente, com grande expressão para o destino futuro do Porto de Leixões, são o “Projeto de Melhoria das Acessibilidades Marítimas e o “Projeto do Prolongamento do Quebra-mar Exterior do Porto de Leixões”.

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho consistiu numa pesquisa bibliográfica exaustiva, de forma a recolher dados referentes a algumas das principais opções que promovem uma resposta adequada a este tipo de necessidades. Foi deste modo retratada a importância para o desenvolvimento do Porto de Leixões através da extensão do quebra-mar exterior, essencialmente devido a limitações construtivas em terra.

Quanto às campanhas de prospeção analisadas, foi dada maior relevância às campanhas da Geosub e Argonvia, sendo estas as mais recentes e fidedignas à realidade atual. As sondagens da Argonvia não ultrapassaram a cota -18,0 (ZHL), e portanto é possível que, em certas zonas do local de obra, se possa encontrar maciço rochoso granítico não aflorante.

Os fundos do local onde se vai realizar o prolongamento do quebra-mar exterior consistem em aluviões lodosas, silto-argilosas e arenosas. Subjacente às aluviões existe uma camada de solos residuais compactos situados sobre um substrato rochoso xistento, gnaissico ou migmatítico medianamente alterado e fraturado.

Na atual extremidade do quebra-mar exterior do Porto de Leixões a espessura de sedimentos, i.e. aluviões e areias, pode alcançar os 13 m. Na zona mais a Sul da infraestrutura portuária, exterior aos molhes, foram detetados afloramentos rochosos associados a destroços de naufrágios (Geosub, 2017).

Os sedimentos devem ser dragados numa primeira fase, utilizando para o efeito dragas de sucção e arrasto. Numa segunda fase deve-se proceder à dragagem dos solos compactos e maciço xistento com escavadora sobre pontão. Os materiais dragados devem ser colocados e transportados em batelões, de forma a permitir o transporte até ao ponto de descarga; o mar (Argonvia, 2019).

Durante a segunda fase de dragagens (desmonte do substrato rochoso) optou-se pelo desmonte mecânico por meio de uma draga de corte e sucção, de forma a reduzir riscos e impactes ambientais.

As operações de dragagem e desmonte deverão ocorrer paralelamente à extensão do quebra-mar exterior para o aproveitamento de materiais para a obra, particularmente para o enchimento do núcleo da estrutura.

Tendo em conta as condições geotécnicas observadas no Porto de Leixões, pode-se dizer que existe alguma heterogeneidade no substrato rochoso analisado. O maciço xistento, gnaissico ou migmatítico, identificado nas sondagens efetuadas pela Argonvia, será desmontado mecanicamente com uma draga de corte e sucção. Não se pode dizer que existe homogeneidade lateral do maciço rochoso porque, consoante os seus graus de alteração e fraturação, os métodos de remoção adequados são distintos. Sendo assim, é expectável que os métodos de remoção de rocha apresentem um rendimento distinto.

Avaliadas as condições geotécnicas da zona-alvo, conclui-se que a metodologia construtiva mais adequada a este cenário é o da empreitada mista (por via marítima e terrestre). A utilização de recursos marítimos permite transportar uma maior quantidade de materiais, mas assim que as cotas de projeto atinjam um valor em que a utilização destes recursos deixa de ser possível, deve-se recorrer à via terrestre. Nesta fase de construção, quando as cotas de projeto são relativamente elevadas, os batelões não conseguem descarregar o material dragado no local de descarga pré-definido.

Após montagem do estaleiro de obra, prosseguir-se-á com a pré-fabricação dos blocos de betão e com a demolição da atual cabeça do quebra-mar exterior. Quanto à extensão do quebra-mar, esta deverá iniciar-se com a colocação dos enrocamentos do núcleo, seguido da colocação dos enrocamentos do submanto e dos blocos de betão do manto de proteção. Posteriormente deverá ser executada a cabeça de inverno provisória e o maciço de coroamento. A obra terminará com a limpeza, desmobilização e desmontagem do estaleiro de obra.

Para concluir, pode-se dizer que os objetivos definidos inicialmente para esta dissertação foram alcançados com êxito. Toda a informação relevante disponível acerca da geologia e geotecnia da zona portuária de Leixões foi compilada, exposta e analisada. Estes estudos permitiram caracterizar, entre outras matérias, o escopo fundamental do estudo desenvolvido, designadamente os substratos do local de implementação do projeto de extensão do quebra-mar exterior do Porto de Leixões e a definição da metodologia construtiva mais adequada para esse fim.

5.2. Apreciações Gerais e Desenvolvimentos Futuros

A realização deste trabalho guiou-se pelo desenvolvimento de um tema por via de um enfoque predominantemente conceptual, com base em estudos pré-existentes. A consideração de inúmeros elementos no que diz respeito às condições geotécnicas do Porto de Leixões foi um dos fatores fundamentais quanto à escolha da tecnologia e metodologia construtiva a implementar para a futura requalificação do quebra-mar exterior.

A análise do enquadramento geológico-geotécnico do local de obra veio a demonstrar-se bastante significativa para a realização da presente dissertação, assim como para a avaliação e perceção de todas as componentes inerentes ao caso de estudo.

A consecução desta obra irá prover o Porto de Leixões de condições de segurança e repor os níveis de competitividade do porto, permitindo que este consiga receber novamente cerca de 80% da frota mundial (atualmente este valor ronda os 50%).

É, contudo, indispensável reconhecer quais as suscetibilidades e impactos positivos e negativos correlacionados com este empreendimento, quer a nível funcional, socioeconómico, ambiental ou paisagístico, em futuros estudos no decorrer da fase de exploração da nova estrutura. Todavia, a maior parcela de repercussões está prevista ocorrer durante a fase de construção da empreitada; junção que não será possível acompanhar e constatar, pois o prolongamento do quebra-mar exterior que estava previsto decorrer durante o período da elaboração da dissertação não se concretizou. Portanto, preconiza-se que a futura intervenção proposta para o Porto de Leixões constitua uma relevante possibilidade para a compilação e processamento de dados na área da dragagem marítima e desmonte subaquático.

Tendo em conta todo o tipo de fatores inerentes à construção de um quebra-mar, particularmente de natureza económica, hidrodinâmica e geomorfológica da zona de implantação, preconiza-se do mesmo modo, que no futuro se encetem outro tipo de estudos de avaliação igualmente oportunos. Recomenda-se que um desses estudos seja referente ao tipo de blocos a utilizar para a colocação e distribuição numa estrutura de proteção desta categoria, tendo em conta a constante evolução de elementos desta natureza. Estes apresentam-se com propriedades cada vez mais eficientes ao nível de reflexão, dissipação de energia ou de proteção quanto à erosão das subcamadas do elemento de proteção.

Recomenda-se, da mesma forma, outros estudos em fase de dimensionamento destas estruturas, como por exemplo análises multicritério para melhorar a previsão de fenómenos de agitação marítima, tendo em conta o escasso conhecimento quanto à origem, comportamento ou efeitos de eventos desta índole, devido a dois fatores:

- Imprevisibilidade destes fenómenos em virtude do impacto das alterações climáticas;

-
- Representatividade insuficiente quanto à caracterização da agitação marítima ao largo de uma estrutura de proteção para condições extremas, permitindo assim uma análise estatística apreciável.

Uma melhor interpretação quanto à atuação deste tipo de manifestações tornará os cálculos teóricos deste tipo de projetos muito mais rigorosos e possibilitará, prematuramente, uma melhor definição quanto às geometrias mais adequadas para diminuir os efeitos destes fenômenos, reduzindo assim os custos inerentes à realização de ensaios de geometrias alternativas. Além disso propiciará, por outro lado, que a manutenção inerente a este tipo de obras seja possivelmente menos frequente no futuro, tendo em conta o tipo de solução otimizada, permitindo assim a recuperação do investimento feito inicialmente.

Não foi possível descrever algumas infraestruturas portuárias de uma forma mais documentada (considerando os aspetos inerentes ao tema da presente dissertação) por insuficiência (ou ausência) de dados históricos e técnicos relativos a estas, especificamente relativo às suas estruturas de proteção costeira. Portanto, seria de enorme interesse que as instituições responsáveis pela gestão das infraestruturas portuárias melhorassem a divulgação das informações relativas aos seus portos, particularmente nos seus portais oficiais. Uma sugestão passa pela atualização desses mesmos portais, onde devem ser publicadas informações mais amplas sobre o estado atual das suas infraestruturas. Seria de igual interesse se houvesse uma maior facilidade de acesso a informações sobre projetos de requalificação estrutural previamente executados nesses mesmos portos e, se possível, projetos a implementar no futuro.

Capítulo VI

Referências Bibliográficas

(página propositadamente em branco)

6. Referências Bibliográficas

- Afonso M.J., Chaminé H.I., Gomes A., Teixeira J., Araújo M.A., Fonseca P.E., Carvalho J.M., Marques J.M., Marques da Silva M.A. & Rocha F., 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica: Revista de Xeografia, Território e Meio Ambiente*, 4: 101-115.
- Alamy, 2019. Casablanca, Morocco – Aerial view of the Port. Date: circa 1940s. In: <https://www.alamy.com/> (consultado em março em 2019).
- Anish W., 2020. What is Dredging? : Marine in Sight. In: <https://www.marineinsight.com/> (consultado em agosto de 2020).
- APDL, 2006. Relatório de Sustentabilidade. APDL, S.A., Porto de Leixões.
- APDL, 2015. Quatro Décadas de Obras Geotécnicas no Porto de Leixões. In: <http://www.ordemengenheiros.pt/> (consultado em março de 2019).
- APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A, 2018. Estudo de Impacte Ambiental das Acessibilidades Marítimas do Porto de Leixões. (Resumo Não Técnico).
- APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A, 2018. Relatório de Gestão e Demonstrações Financeiras.
- APDL – Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A. Porto de Leixões, 2019. In: <http://www.apdl.pt/> (consultado em junho de 2019).
- APS – Administração dos Portos de Sines e do Algarvae, S.A., 2014. Estudo de Impacte Ambiental da Expansão do Terminal de Contentores (TXXI) do Porto de Sines (3.ª e 4.ª fases). Volume III. 26 p. (Resumo Não Técnico).
- Argonvia – Serviços de Engenharia, 2019. Prolongamento do Quebra-mar Exterior e das Acessibilidades Marítimas – Projeto de Execução das Acessibilidades Marítimas ao Porto de Leixões. (Relatório do Reconhecimento Geotécnico).
- Ashcroft W., 2011. A Petroleum geologist's guide to seismic reflection. Wiley-Blackwell.
- Bakker P. et al., 2003. Development of concrete breakwater armour units. Gouda: Delta Marine Consultants b.v.
- Bento M. J., 2018. “Obra no porto de Leixões está a gerar contestação”. In: <https://www.cmjornal.pt/> (consultado em setembro de 2019).
- Burcharth F., d’Angremond K., van der Meer J. W. & Liu Z., 2000. Empirical formula for breakage of Dolosse and Tetrapods. *Coastal Engineering*, 40(3): 183-206.
- Burcharth F. & Liu Z., 1992. Design of dolos armour units. *Costal Engineering Proceedings*, 1(23): 1053-1066.
- Castro J., 2018. Tendências de evolução dos transportes marítimos internacionais e implicações nas infraestruturas portuárias. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- Chaminé H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R., Galiza A.C., 2013. Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Journal*, 36: 27-33.

-
- Chaminé H.I., Gama Pereira L.C., Fonseca P.E., Noronha F. & Lemos de Sousa M.J., 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe* 28: 37-78.
- CERC, 1984. Shore Protection Manual [SPM]. 4th edition. Coastal Engineering Research Centre, US Army Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi.
- CIRIA, CUR & CETMEF, 2007. The Rock Manual: The use of Rock in hydraulic engineering. 2nd edition. C683, CIRIA, London.
- Cleto J., 1998. Leça da Palmeira: Administração dos Portos de Douro e Leixões. In: *Site do Porto de Leixões*. <https://www.apdl.pt/historia> (consultado em Outubro de 2019)
- Comissão Europeia, 2016. Commission Staff Working Document - on the Implementation of the EU Maritime Transport Strategy 2009-2018. Bruxelas: Comissão Europeia.
- Consulmar, 2017. Projeto das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões - Projeto Execução. (Relatório Técnico).
- Consulmar/Nemus, 2018. EIA do Prolongamento do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões. Volume I – Relatório Síntese. Processo de AIA n.º 3001: 9-99
- Contratas A., 2018. Ampliación Puerto Musel Gijón (Dique Torres). In: <https://alvargonzalez.as/> (consultado em agosto de 2020).
- Costa A., 2017. Quebramares de taludes. O galgamento na ruína do molhe sul da praia da Vitória. IST, Técnico Lisboa. (Dissertação de Mestrado).
- Cunha P., 2009. Dimensionamento otimizado de um quebra-mar de taludes. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- Delft Hydraulics, 2004. La Coruña: Langosteira breakwater.
- Dias P., 2009. Soluções técnicas para o rebaixamento dos fundos de cais acostáveis. Porto: FEUP. 172 p. (Dissertação de Mestrado).
- Ferreira T., 2009. Projeto de reformulação do quebra-mar norte do Porto de Leixões. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- Freire J., Alonso E., Arquero F. & González V., 2012. The Project of the New Outer Port of A Coruña, Spain. *PIANC Yearbook 2011 – Technical Articles dedicated to Spain, Host Country of PIANC's AGA 2012*. PIANC. Bruxelas: 225 - 240.
- Freitas A., 2009. O Porto de Leixões de 1930 a 1990: História de Matosinhos contada aos jovens. In: <http://matosinhosantigo.blogspot.com/2009/11/o-porto-de-leixoes-de-1930-1990.html> (consultado em dezembro de 2019)
- Geosub, 2017. Campanha de Prospecção Geofísica realizada no Porto de Leixões. Relatório Técnico Final – RTF 010SSM/2017: 27 p.
- Gomes F.V., 2017. Intervenções e estruturas de defesa costeira. Elemento de consulta na disciplina de Trabalhos Marítimos II, 5º ano de Licenciatura em Engenharia Civil da FEUP.

-
- Gomes F.V., Taveira F. & Lopes H., 2003. Relatório sobre as condições de operacionalidade no terminal petrolífero do Porto de Leixões. Relatório de Análise dos Registos de Operacionalidade e Intervenções no Quebra-mar Norte. IHRH.
- Gomes F.V., Taveira F. & Lopes H., 2003. Relatório sobre as condições de operacionalidade no terminal petrolífero do Porto de Leixões. Relatório de Modelação Física, IHRH. 6 p.
- Gomes F.V., 1981. Espreadimento de Ondas Regulares Sobre Taludes de Obras Marítimas. Editorial Engenharia. Laboratório de Hidráulica, FEUP, Porto. (Dissertação de Doutoramento).
- Google Earth, 2020. Porto de Leixões. Porto. 41°10'53'' N; 8°43'16'' W. In: <https://www.google.com/earth/> (consultado em abril de 2019).
- Guerra, J. & Carlos, 2010. Valorização e Qualificação Ambiental e Territorial - Sistema de Gestão e Informação Ambiental dos Espaços Classificados do Concelho de Matosinhos. C.M. Matosinhos. Porto.
- Gutiérrez-Serret R., Grassa J. & Grau J., 2009. Breakwater development in Spain. The last ten years.
- Gutiérrez-Serret R. & Grassa J.M., 2015. Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX. Ribagua – Revista Iberoamericana del Agua, 2: 80-96.
- Hatton L., Worthington M. & Makin J., 1986. Seismic Data Processing: Theory and Practice. Blackwell Scientific Publications. 177 p.
- Holthuijsen L., 2007. Waves in oceanic and coastal waters. Delft: Delft University of Technology.
- Hudson R. Y., Herrmann F. A. & Sager R.A., 1979. Coastal hydraulic models. Special Report. Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station. US Army Corps of Engineering, USA. 531 p.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 85-110.
- Johnson P. & Helferty M., 1990. The Geological Interpretation of Side-Scan Sonar. Reviews of Geophysics, 28(4):157-380.
- King H. M., 2005. Phyllite: A foliated metamorphic rock composed mainly of tiny mica grains in parallel alignment. In: <https://geology.com/rocks/phyllite.shtml> (consultado em outubro de 2020).
- Lima L., 2008. Dragagem, transporte e disposição final de sedimentos de leito de rio. Estudo de caso: calha do rio Tietê – fase 2. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).
- LNEC, 2009. Observação Sistemática de Obras Marítimas, Quebra-mares do Porto de Viana do Castelo, Campanha de observação visual efectuada em 2009, Relatório 61/2010 – NPE.
- Logística & Transportes Hoje, 2018. Porto de Sines recebe visita de potenciais investidores. In: <https://www.logisticaetransporteshoje.com/> (consultado em setembro de 2019).
- Lopes H., 2005. Ensaio em modelo físico do comportamento hidráulico e estrutural do quebra-mar norte do porto de Leixões. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- Lopes H., 2018. Apontamentos da unidade curricular “Obras Marítimas e Fluviais”: Aula 5. Ano letivo 2018/2019. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 11 p.

-
- Oliveira R., 1986. Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas. Conceitos fundamentais. Metodologia de estudo dos maciços rochosos. II Simpósio Sul-americano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre, Brasil: 203-214.
- Pacheco C., 2014. Geologia da área do Porto de Leixões, com base em dados geofísicos, sondagens e levantamentos de campo. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- Pereira E., 1992. Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:200 000. Folha 1. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Pinheiro L., Coelho C., Silva P. & Gonçalves D., 2011. Dragagens - Fundamentos, Técnicas e Impactos. Aveiro: Universidade de Aveiro. 279 p.
- Pires A., Chaminé H.I., Rocha F., 2016. Algumas considerações práticas sobre a importância da cartografia de geomateriais em geotecnia portuária e marítima. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 191 – 220.
- Pires A., Chaminé H.I., Piqueiro F. & Rocha F., 2014. Coastal geo-engineering techniques for the assessment of rock armour structures. *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(2): 155-178
- Pita C., 1985. Considerações sobre a observação de quebra-mares de talude. Memória Nº 647. Lisboa: LNEC. 17 p.
- Pita C., 1986. Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Taludes. Memória nº 670. Lisboa: LNEC. 68 p.
- Pita C., 1985. Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Boletim de Informação Técnica 37 – 2º Trimestre. Lisboa.
- Port Sines Investigating Panel, 1982. Failure of the Breakwater at Port Sines, Portugal. American Society of Civil Engineers, New York.
- Portogente, 2019. Projeto de Porto (2). Portopédia. In: <https://portogente.com.br> (consultado em setembro de 2019).
- Reis M.T., Neves M.G., Lopes M.R. & Silva L.G., 2011. Estudos de galgamento do molhe oeste do porto de Sines. PIANC, 6 e 7/10/2011, Porto.
- Robinson R., 2009. Portuguese Empire. Microsoft® Encarta® Online Encyclopedia. In: https://www.webcitation.org/5kwbWzvJp?url=http://uk.encyclopedia.msn.com/encyclopedia_781533808/portuguese_empire.html (consultado em fevereiro de 2019).
- Roca M. N. & Pimentel D., 2003. Causas prováveis das migrações internas em Portugal na década de noventa. *Geolnova*, UNL (<http://geoinova.fcsh.unl.pt/revistas/files/n8-5.pdf>)
- Santos J. A., Silva L.G., Neves M.G., Silvestre C., Oliveira P., Pascoal A., Sebastião L. & Alves J., 2004. Inspeção e diagnóstico do molhe Oeste do Porto de Sines. 7º Congresso da água, LNEC, 8 a 12/03/2004, Lisboa.
- Sheriff R. & Geldart L., 1995. Exploration Seismology. Cambridge: University of Cambridge. 592 p.

-
- Silva J., 2018. Contributos para a otimização de metodologias de desmonte em canais e portos: O caso do Porto de Leixões. Porto: ISEP. (Dissertação de Mestrado).
- Sorensen R., 1997. Basic Coastal Engineering. 2nd edition. Chapman & Hall, New York.
- Sousa F. & Alves J.F., 2002. Leixões. Uma História Portuária. Porto, APDL.
- Stoker M., Pheasant J. & Josenhans H., 1997. Seismic Methods and Interpretation. British Geological Survey & Geological Survey of Canada (Atlantic) Dartmouth. 315 p.
- Taveira F., 2001. Dimensionamento Hidráulico e Estrutural de Quebramares de Taludes. Porto: FEUP.
- Taveira F., 2017. Dimensionamento Hidráulico. Estruturas de Quebramares de Talude. Elemento de consulta na disciplina de Trabalhos Marítimos I, 5º ano de Licenciatura em Engenharia Civil da FEUP.
- Taveira F. & Cunha P., 2010. Dimensionamento otimizado de quebra-mares de taludes. In: 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP. 9 p.
- Taveira F. & Neves A., 2003. A Importância da consideração do carácter irregular da agitação marítima no dimensionamento de quebra-mares de taludes. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 17 p.
- Tecnasol FGE - Fundações e Geotecnia, S.A., 2004. Prospecção Geológica no Anteporto e no Canal de Acesso à Doca Nº4 do Porto de Leixões - Relatório.
- Teixeira C. & Costa C., 1957. Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal: Folha 9-C. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira R., 2012. Quebramares portugueses. Inventário e análise comparativa de soluções. Porto: FEUP. (Dissertação de Mestrado).
- USACE, 2015. Coastal Engineering Manual (CEM) – Part II. US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 623 p.
- USACE, 2015a. Coastal Engineering Manual (CEM) – Part V. US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 674 p.
- USACE, 2015b. Coastal Engineering Manual (CEM) – Part VI. US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 771 p.
- van der Meer J. W., 1988. Stability of cubes, tetrapods and accropode. Design of Breakwaters, Thomas Telford. In: Proceedings of the Conference on Breakwaters '88 Eastbourne, Institution of Civil Engineers: 71-81.
- Vera-Cruz D., 1969. Generalidades sobre Quebra-Mares Tradicionais. Particularidades Sobre Quebra-Mares de Taludes. Memória nº 339. LNEC, Lisboa.
- Verhoeven P., 2018. Terra Et Aqua #150 – March 2018. Entrevista. IADC, Holanda: 31 p.
- Vlasblom W. J., 2003. Designing Dredging Equipment. Chapter 1 – Introduction. 27 p.
- Yilmaz Ö., 2001. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Vol. I. Society of Exploration Geophysicists. 2027 p.

Sítios da Internet:

<https://apambiente.pt/> (consultado em março de 2019)

<http://www.apdl.pt/> (consultado em setembro de 2019)

<http://viana.apdl.pt/> (consultado em agosto de 2020)

<http://www.lnec.pt/> (consultado em agosto de 2020)

<https://www.marinetraffic.com/> (consultado em fevereiro de 2019)

<http://www.portodesines.pt/> (consultado em agosto de 2020)

<http://www.puertocoruna.com/es/index.html> (consultado em agosto de 2020)

<http://www.puertos.es/en-us> (consultado em agosto de 2020)

<https://www.puertogijon.es/> (consultado em agosto de 2020)

Anexos

(página propositadamente em branco)

Anexos

Índice de Anexos

Anexo I – Secção transversal do quebra-mar submerso localizado no extradorso do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

Anexo II – Componentes integrantes de um quebra-mar de taludes convencional.

Anexo III – Secção transversal do quebra-mar norte, de tipologia mista, do novo porto exterior de Punta Langosteira.

Anexo IV – Quebra-mar Torres (secção do tramo final) de tipologia mista, e quebra-mar vertical norte do Porto de Gijón.

Anexo V – Secção transversal do elemento de proteção que serviu de base à construção do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

Anexo VI – Secção transversal do quebra-mar submerso do Porto de Leixões idealizado em fase de projeto, à cota de coroamento +0,00m (ZHL).

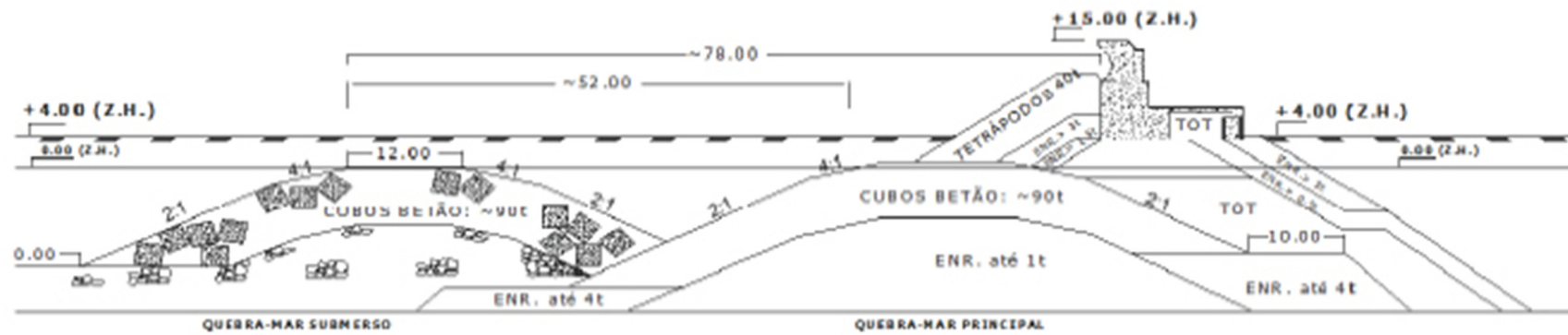
Anexo VII – Planta estrutural de implementação do quebra-mar exterior do Porto de Leixões com os perfis transversais PT1, PT4 e PT10.

Anexo VIII – Perfis transversais PT1, PT4 e PT10, realizados no âmbito do EIA do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

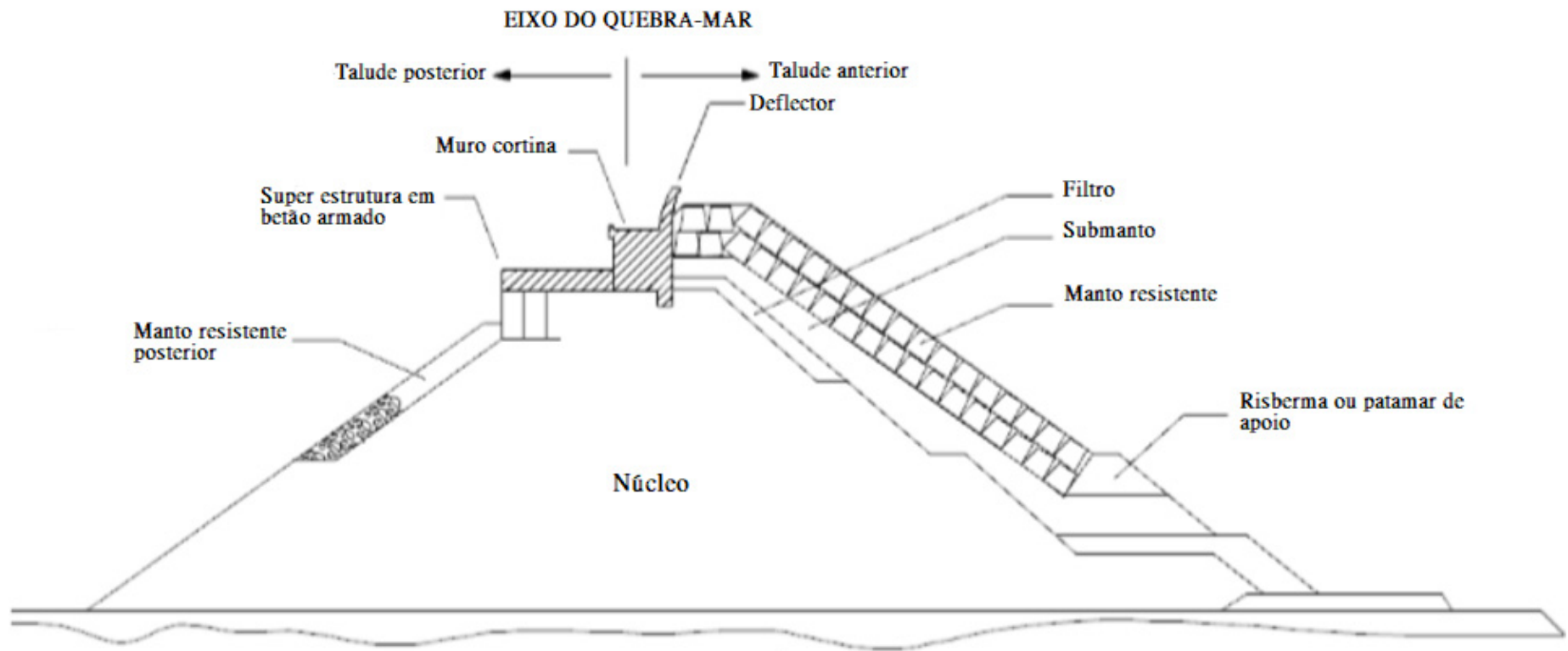
Anexo IX – Planta com a localização das sondagens realizadas no âmbito da campanha de prospeção da ARGONVIA.

Anexo X – Interpretação geológica da área portuária de Leixões com base em perfis sísmicos efetuados pela Universidade de Aveiro em 2009.

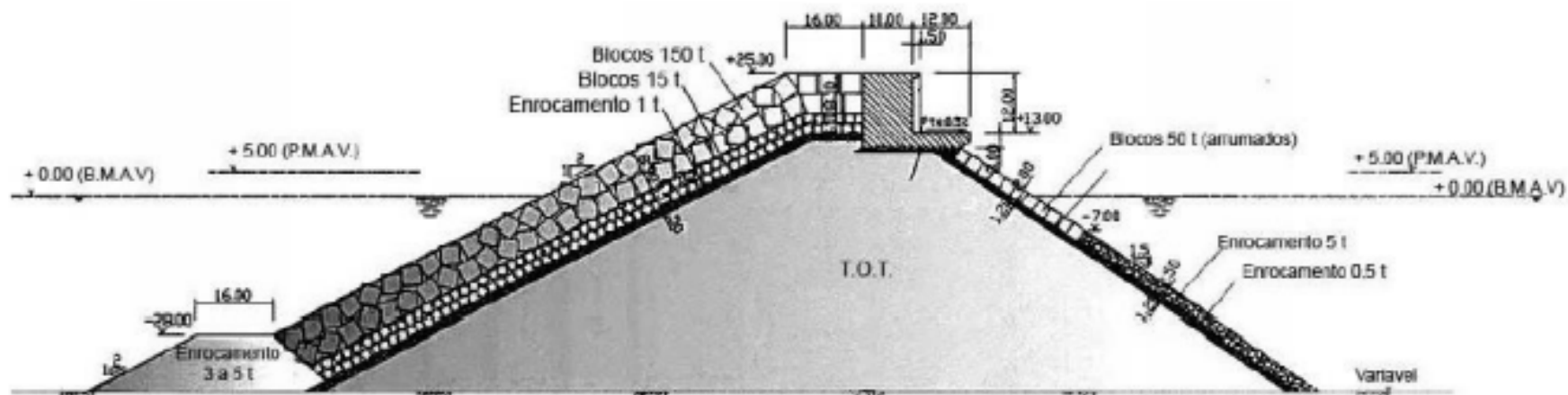
Anexo I – Secção transversal do quebra-mar submerso localizado no extradorso do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (APDL, 1982).



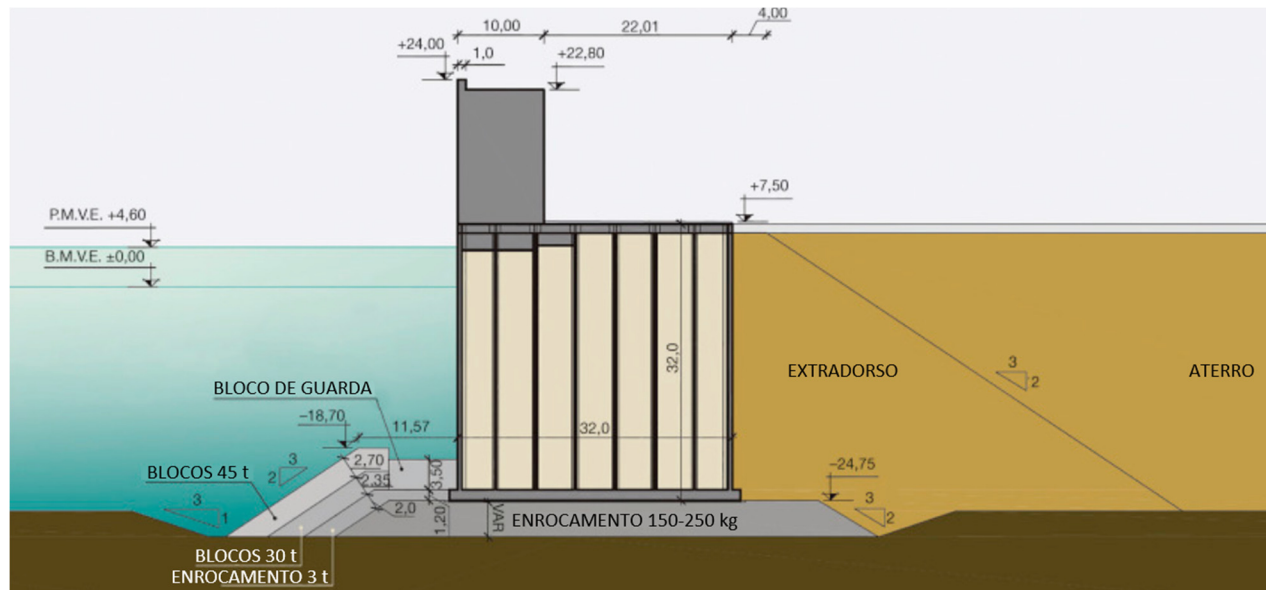
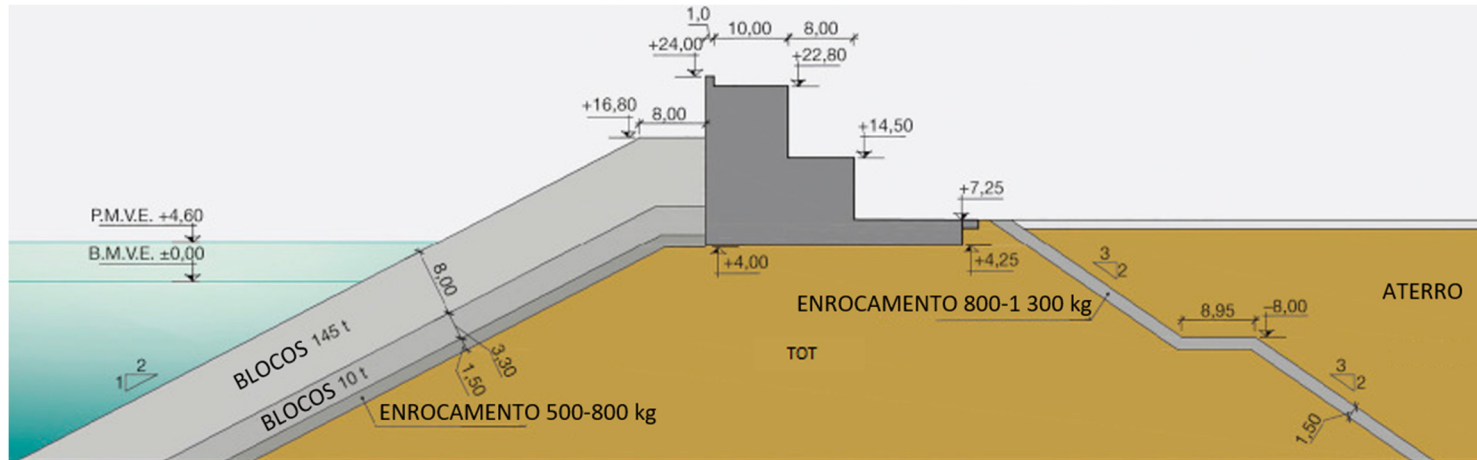
Anexo II – Componentes integrantes de um quebra-mar de taludes convencional (adaptado de Pita, 1986).



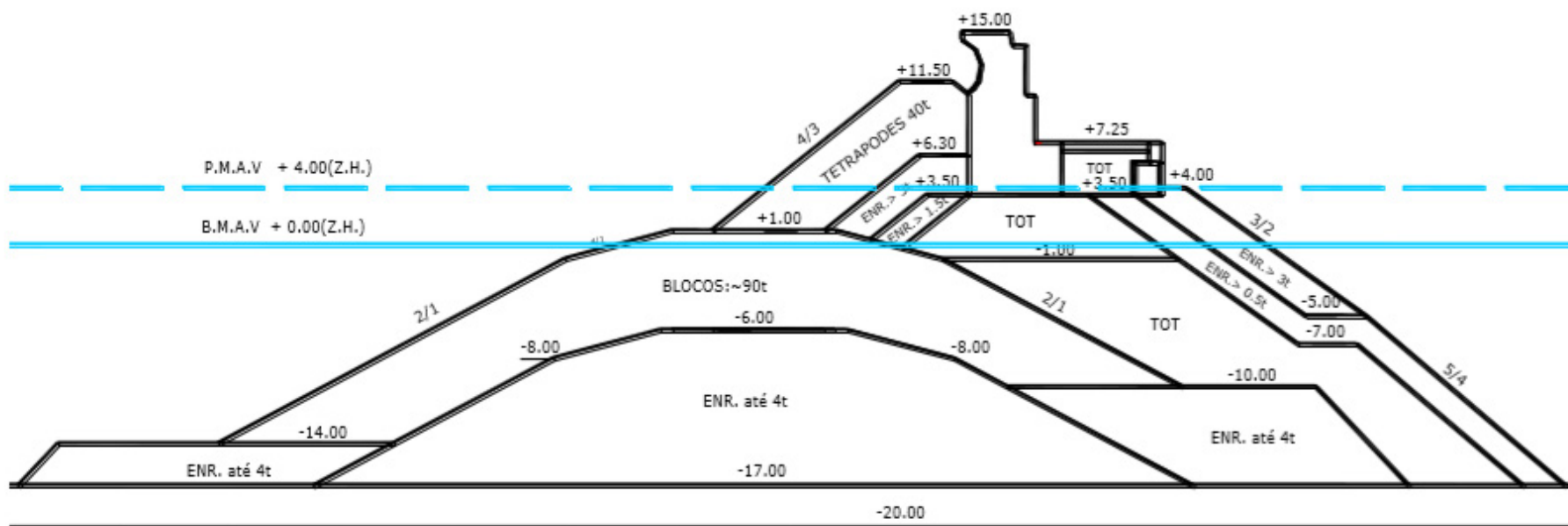
Anexo III – Secção transversal do quebra-mar norte, de tipologia mista, do novo porto exterior de Punta Langosteira (Delft Hydraulics, 2004).



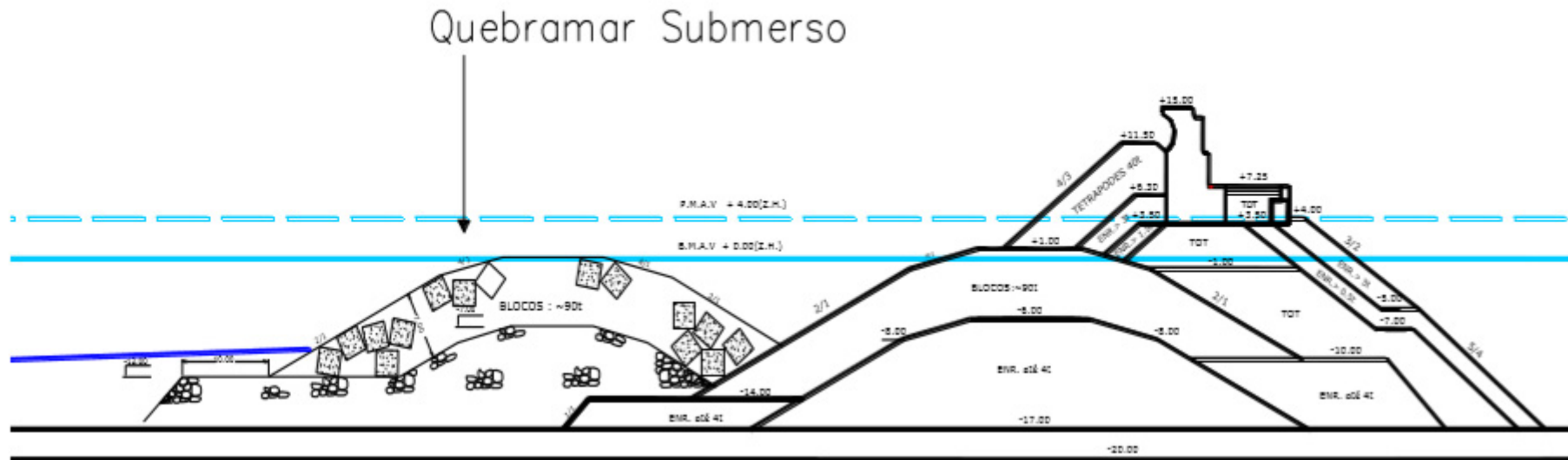
Anexo IV – Quebra-mar Torres (secção do tramo final; acima) de tipologia mista, e quebra-mar vertical norte (abaixo) do Porto de Gijón (adaptado de Gutiérrez-Serret e Grassa, 2015).



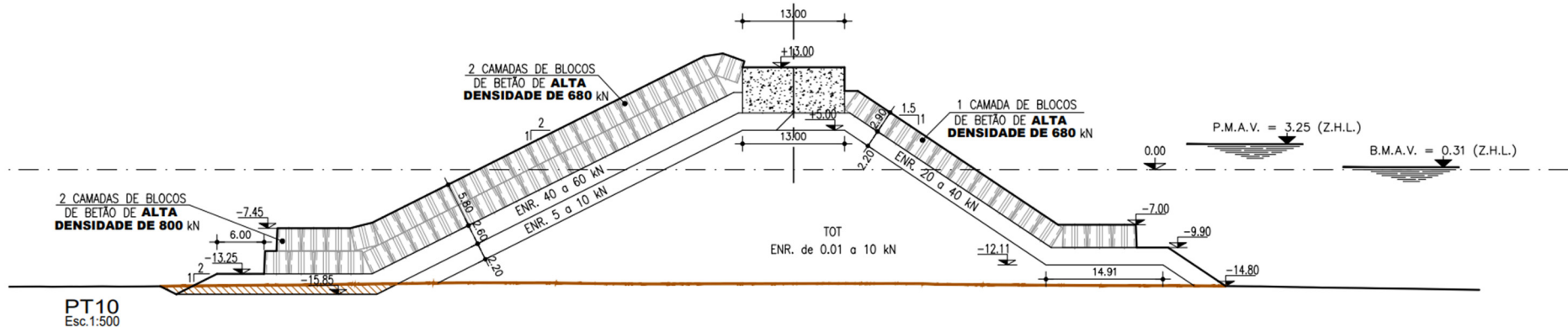
Anexo V – Secção transversal do elemento de proteção que serviu de base à construção do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (Gomes et al., 2003).



Anexo VI – Secção transversal do quebra-mar submerso do Porto de Leixões idealizado em fase de projeto, à cota de coroamento +0,00m (ZHL) (Gomes et al., 2003).



Anexo VIII – Perfis transversais PT1, PT4 e PT10, realizados no âmbito do EIA do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (Consulmar, 2017).

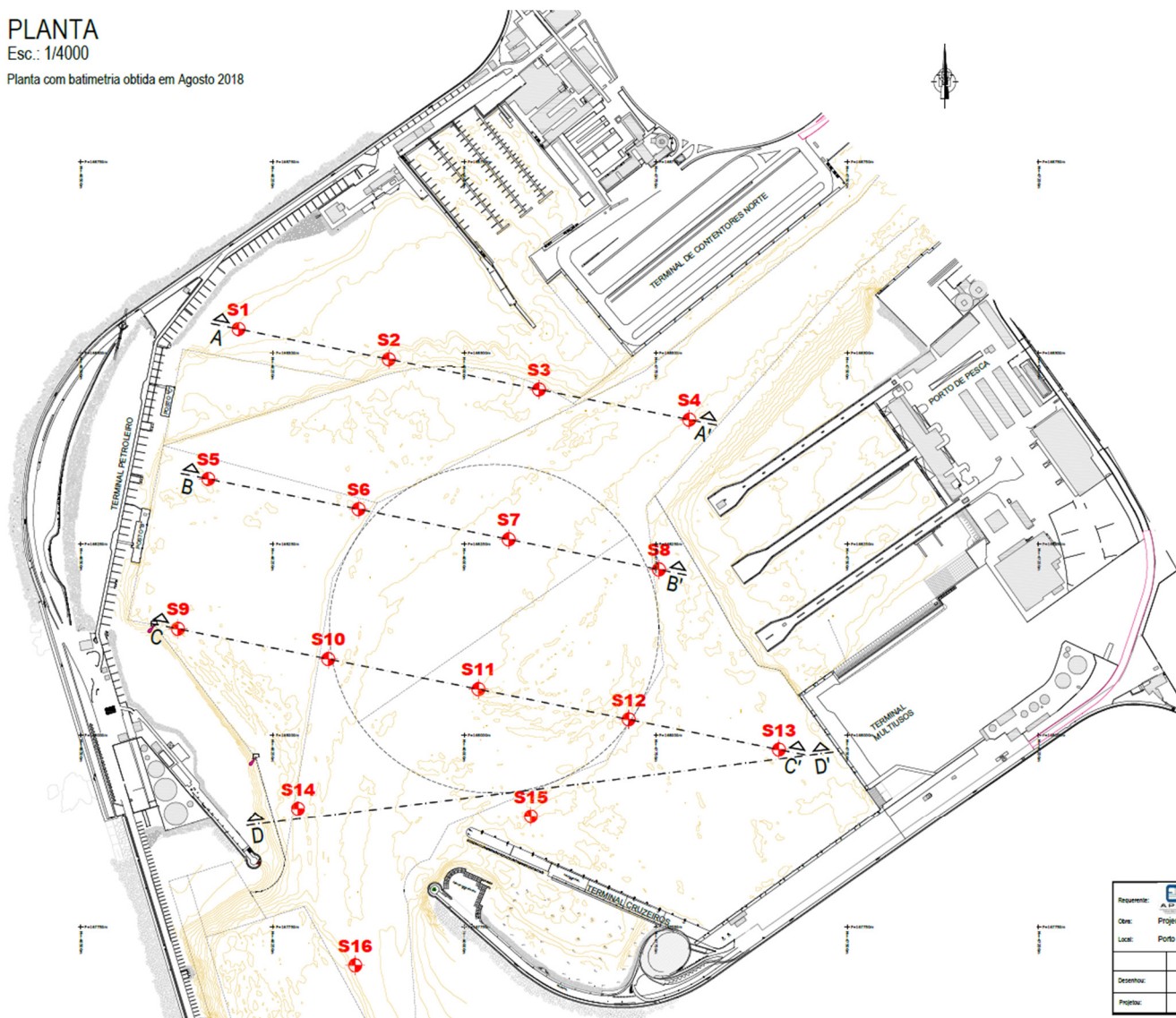




Anexo IX – Planta com a localização das sondagens realizadas no âmbito da campanha de prospeção da Argonvia (adaptado de ARGONVIA, 2019).

PLANTA

Esc.: 1/4000

Planta com batimetria obtida em Agosto 2018



				FOLHA: 1/1 Esc.: 1:4000 1:2000, 1:200
Obra: Projecto de Execução das acessibilidades marítimas ao Porto de Leixões Local: Porto de Leixões - Matosinhos				
Desenhado:	DATA: Fev. 2019	NOME: M. Costa		
Projecto:	DATA: Fev. 2019	NOME: A. Aguiar		

Anexo X – Interpretação geológica da área portuária de Leixões com base em perfis sísmicos efetuados pela Universidade de Aveiro em 2009 (Pacheco, 2014).

