Obras Marítimas de Acostagem: O Caso do Porto de Abrigo da Ilha do Porto Santo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nuno Miguel Barros de Sousa
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

| 2011

Obras Marítimas de Acostagem:
O Caso do Porto de Abrigo da Ilha do Porto Santo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nuno Miguel Barros de Sousa
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO
Luiz Carlos Guerreiro Lopes

UNIVERSIDADE da MADEIRA

OBRAS MARÍTIMAS DE ACOSTAGEM: O CASO DO PORTO DE ABRIGO DA ILHA DO PORTO SANTO

Nuno Miguel Barros de Sousa
Licenciado em Engenharia Civil

Orientador:
Prof. Doutor Luiz Carlos Guerreiro Lopes

Co-Orientador:
Eng. Luís Filipe Madeira Teixeira

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Funchal, Agosto de 2011

AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer e reconhecer todo o apoio, disponibilidade, ensinamentos e orientação prestados pelo seu orientador, Prof. Doutor Luiz Carlos Guerreiro Lopes, durante a realização desta dissertação.

Agradecer de igual forma ao Eng. Luís Filipe Madeira Teixeira, responsável pela ETERMAR – Engenharia e Construção, S.A. na Ilha da Madeira, pelo seu interesse na co-orientação.

Agradecer também à ETERMAR – Engenharia e Construção, S.A. (Madeira), na pessoa do Eng. Ricardo Emanuel Quaresma Nunes, por toda a documentação fornecida e pelos ensinamentos prestados.

Deus!

ÍNDICE

RESUMO vii

ABSTRACT viii

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABELAS xii

1 INTRODUÇÃO 1

2 FACTORES DE PLANEAMENTO E CONCEPÇÃO DE PROJECTOS DE ENGENHARIA COSTEIRA E MARÍTIMA 3

2.1 Planeamento e projecto 5

2.2 Optimização do projecto e estudo de risco 7

3 PRINCIPAIS TIPOS E FUNÇÕES DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS 12

3.1 Diques 12

3.2 Esporões 13

3.3 Paredões 15

3.4 Revestimentos 16

3.5 Paredes verticais 17

3.6 Quebra-mares destacados 18

3.7 Quebra-mares recife 20

3.8 Soleiras submersas 21

3.9 Alimentação de praias e construção de dunas 22

3.10 Quebra-mares 24

3.10.1 Quebra-mares de talude 25

3.10.2 Quebra-mares de parede vertical 27

3.10.3 Quebra-mares mistos 28

3.11 Quebra-mares flutuantes 28

3.12 Molhes 29

3.13 Muros guias 30

3.14 Barreiras contra marés de tempestade 31

3.15 Emissários 32

3.16 Estruturas de estacas 33

3.17 Protecções contra a erosão..... 34

4 OBRAS MARÍTIMAS DE ACOSTAGEM..... 37

4.1 Paramento fechado..... 38

4.1.1 Estruturas gravíticas de acostagem..... 38

4.1.1.1 Paredes de blocos..... 38

4.1.1.2 Paredes de caixotões..... 40

4.1.1.3 Paredes de elementos celulares..... 41

4.1.2 Paredes de estacas-prancha..... 44

4.1.2.1 Paredes de estacas-prancha simples..... 44

4.1.2.2 Paredes de estacas-prancha com plataforma de alívio.... 45

4.2 Paramento aberto..... 47

4.3 Tipos de configuração dos molhes..... 48

4.3.1 Molhes paralelos à costa..... 48

4.3.2 Molhes convergentes entre si..... 48

4.3.3 Molhes paralelos entre si..... 50

4.4 Acções das embarcações e sistemas de defensa..... 50

4.4.1 Atracação..... 50

4.4.2 Amarração..... 51

4.4.3 Defensas..... 53

4.4.3.1 Defensas de gravidade..... 54

4.4.3.2 Defensas elásticas..... 55

4.4.3.3 Defensas flutuantes..... 55

5 TIPOS DE BLOCOS DE BETÃO UTILIZADOS EM OBRAS MARÍTIMAS..... 56

6 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA OBRA DE RECUPERAÇÃO DO PORTO DE ABRIGO DO PORTO SANTO..... 62

6.1 Enquadramento da área em estudo..... 62

6.1.1 Enquadramento geográfico..... 62

6.1.2 Enquadramento climático..... 63

6.2 Estudos realizados para a preparação da obra de recuperação do porto de abrigo..... 64

6.2.1 Batimetria e natureza dos fundos..... 64

6.2.2 Elementos hidrográficos e outras inspecções..... 66

6.2.3 Regime de marés e correntes..... 67
6.2.4 Agitação marítima..... 67
6.2.5 Estudo da estabilidade do manto..... 69
6.3 Caracterização da obra existente..... 70
6.4 Diagnóstico da situação que motivou a reparação..... 74
6.5 Descrição da solução implementada..... 75
6.6 Ordem de trabalhos..... 83
6.7 Meios, quantidades e volumes utilizados..... 90
6.7.1 Volumes e quantidades de material..... 90
6.7.2 Meios humanos e equipamentos..... 91
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 95
7.1 Principais conclusões do estudo realizado..... 95
7.2 Sugestões de trabalho futuro..... 99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 100
A DIMENSIONAMENTO DA PROTECÇÃO CONTRA A ACÇÃO DAS ONDAS..... 108
B MATERIAIS USUALMENTE UTILIZADOS EM OBRAS MARÍTIMAS..... 120

RESUMO

O projecto e a execução de estruturas costeiras, marítimas e portuárias apresentam elavada complexidade, envolvendo a consideração de um grande número de factores e restrições e a utilização sinergética de conhecimentos oriundos de diferentes áreas do saber.

Nesta dissertação, efectua-se inicialmente uma breve descrição das questões e preocupações que decorrem destas obras, bem como dos métodos de auxílio e validação dos cálculos utilizados no dimensionamento dessas estruturas, de modo a melhor aproximar o projecto à realidade, permitindo com isto antecipar e corrigir potenciais problemas.

Além disso, nesta dissertação são apresentados os diferentes tipos de obras marítimas, as suas funções e os objectivos de cada uma delas, bem como os materiais utilizados e alguns dos seus métodos constructivos, descrevendo-se as diversas soluções que podem ser implementadas consoante as necessidades locais, a realidade económica existente e os materiais mais adequados a aplicar, sendo dada especial ênfase às obras marítimas de acostagem, tendo como caso de estudo a obra de recuperação do porto de abrigo da Ilha do Porto Santo, no Arquipélago da Madeira, sendo focados neste estudo os seus parâmetros essenciais, como o enquadramento climático e geográfico, os estudos preliminares e diagnósticos realizados, a caracterização da obra e da solução implementada, bem como a ordem de trabalhos e os meios necessários à sua execução.

São também expostas as metodologias de cálculo das dimensões e do peso dos blocos de protecção e do enrocamento, bem como das espessuras das diferentes camadas por estes formadas, projectadas para dissipar a energia da agitação marítima, sendo ainda apresentados os resultados da aplicação de tais metodologias simplificadas de cálculo à obra de reabilitação portuária escolhida para este estudo.

Palavras-chave:
Obras marítimas e portuárias, estruturas costeiras, molhes, porto de abrigo, Ilha do Porto Santo.

ABSTRACT

The design and execution of coastal, marine and port structures are highly complex, involving the consideration of a variety of factors and constraints and the synergetic use of knowledge from different areas.

In this dissertation, it is first provided a brief description of the issues and concerns arising from these works, as well as of the methods to support and validate the structural engineering calculations, in order to bring the project to reality and thus allowing to anticipate and fix potential problems.

In addition, this dissertation outlines the different types of marine works, the function and objective of each one of them, along with the materials and methods used in their construction, describing the various solutions that can be implemented according to the local needs, the existing economic reality, and the most appropriate materials to use, being given particular emphasis on harbour works, taking as a case study the rehabilitation works of the shelter harbour of Porto Santo island, in the Archipelago of Madeira, focusing this study on their essential parameters, such as the climatic and geographical framework, the preliminary studies and diagnostics performed, the characterization of the work and of the implemented solution, as well as the task schedule and the means for its execution.

The methodologies for calculating the dimensions and weight of the protection blocks and of the rockfill, as well as the thickness of the different layers formed by them, designed to dissipate the energy of sea waves are also exposed, being presented the results of the application of such simplified calculation methodologies to the harbour rehabilitation work chosen for this study.

Keywords:
Marine and harbour works, coastal structures, jetties, shelter habour, Porto Santo Island.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de um modelo físico de uma obra marítima……..8

Figura 3.1 – Dique……13
Figura 3.2 – Campo de esporões……15
Figura 3.3 – Paredão e paredão e esporão ……16
Figura 3.4 – Revestimento em betão……17
Figura 3.5 – Parede vertical formada por estacas-prancha……18
Figura 3.6 – Quebra-mar destacado……20
Figura 3.7 – Quebra-mar recife……21
Figura 3.8 – Colocação de rochas para a formação de soleiras submersas……22
Figura 3.9 – Alimentação artificial de uma praia……23
Figura 3.10 – Quebra-mar constituído por blocos de betão……25
Figura 3.11 – Quebra-mar de talude……26
Figura 3.12 – Exemplo de um modelo de enrocamento de várias camadas……26
Figura 3.13 – Quebra-mar vertical em betão armado preenchido por areia……27
Figura 3.14 – Quebra-mar misto……28
Figura 3.15 – Quebra-mar flutuante em betão……29
Figura 3.16 – Molhe……30
Figura 3.17 – Muro de aproximação……31
Figura 3.18 – Barreiras móveis contra marés de tempestade……32
Figura 3.19 – Emissário……33
Figura 3.20 – Instalação petrolífera sobre estacas……34
Figura 3.21 – Protecção contra a erosão por meio de geotêxtil preenchido com areia..35

Figura 4.1 – Parede de blocos……39
Figura 4.2 – Criação de colunas de rocha……40
Figura 4.3 – Tipos de células de estacas-prancha mais comuns……41
Figura 4.4 – Exemplo de uma muralha celular……43
Figura 4.5 – Exemplo de paredes de estacas-prancha: ancorada; com cavalete……45
Figura 4.6 – Exemplo de parede de estacas-prancha com plataforma de alívio……46
Figura 4.7 – Exemplo de estruturas de paramento aberto: com plataforma de alívio com estacas inclinadas; ancoragem de apoio……47

Figura 4.8 – Molhe paralelo à costa.....49
Figura 4.9 – Molhes convergentes.....49
Figura 4.10 – Molhes paralelos entre si.....50
Figura 4.11 – Elementos de fixação dos cabos de amarração.....51
Figura 4.12 – Exemplo de sistema de amarração.....52
Figura 4.13 – Vários tipos de elementos de defensa: cilíndrica radial; arco; axial; cone; pneumática; rodas 54

Figura 5.1 – Tipos de blocos de betão mais comuns.....57
Figura 5.2 – Blocos celulares tipo Cob.....59
Figura 5.3 – Blocos de betão tipo Antifer.....60
Figura 5.4 – Blocos de betão tipo tetrápode.....61
Figura 5.5 – Bloco de betão do tipo Xbloc 61

Figura 6.1 – Área geográfica da Macaronésia.....62
Figura 6.2 – Carta altimétrica e batimétrica do Porto Santo.....65
Figura 6.3 – Inspecção à parte imersa do molhe do Porto Santo.....66
Figura 6.4 – Exemplo de propagação da agitação marítima próximo ao molhe principal do Porto Santo..... 68
Figura 6.5 – Altura significativa das ondas no alinhamento do molhe principal.....70
Figura 6.6 – Defensas pneumáticas..... 71
Figura 6.7 – Vista geral do porto de abrigo do Porto Santo.....72
Figura 6.8 – Perfil tipo do molhe (N80°E)... 73
Figura 6.9 – Ilustração de tetrápodes partidos 75
Figura 6.10 – Pedaços dos tetrápodes partidos usados no enrocamento.....77
Figura 6.11 – Cabeça do molhe protegida por blocos Antifer e detalhe dos blocos de protecção.....77
Figura 6.12 – Zona mais crítica para o manto da estrutura.....78
Figura 6.13 – Aumento da secção na zona da cabeça do molhe..... 79
Figura 6.14 – Possíveis soluções para a redução de danos na cabeça da estrutura.....79
Figura 6.15 – Ilustração do perfil de reconstrução..... 80
Figura 6.16 – Indicação do tipo e da localização dos blocos de betão utilizados no manto para a reabilitação do molhe.....81
Figura 6.17 – Tipos de cantos expostos às ondas: convexo; côncavo.....82

Figura 6.18 – Fissuras e degradação na superstrutura……..83
Figura 6.19 – Betonagem dos dois tipos de blocos de betão usados no manto do molhe……85
Figura 6.20 – Desmoldagem dos tetrápodes……..…..86
Figura 6.21 – Grua principal de remoção e colocação de elementos constituintes do manto no molhe principal……..….86
Figura 6.22 – Depositação de enrocamento por meio da grua……..88
Figura 6.23 – Colocação dos blocos Antifer com a canga……89
Figura 6.24 – Movimentação dos blocos tetrápodes visando seu armazenamento...93
Figura 6.25 – Pá carregadora a depositar rochas na caixa metálica……..94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tipos e funções das estruturas marítimas……36

Tabela 6.1 – Vento no Porto Santo no período de 1961 a 1990 de acordo com o rumo……63

Tabela 6.2 – Vento no Porto Santo no período de 1961 a 1990 de acordo com o mês……64

Tabela 6.3 – Valores extremos de ondas, em metros, na costa sul da Madeira……69

Tabela 6.4 – Verificação das características do enroncamento……75

Tabela 6.5 – Verificação das características do manto de blocos Antifer……76

Tabela 6.6 – Resumo de quantidades de blocos de betão……91

Tabela 6.7 – Resumo de quantidades de material compósito do núcleo……91

1 INTRODUÇÃO

Existem diversas situações que podem levar à construção de estruturas costeiras e marítimas, como a necessidade da criação de zonas seguras de atracação e de protecções eficientes contra a inundação e a erosão da costa, a execução de ligações entre zonas relativamente próximas separadas por água e a disponibilização de áreas de recreio, lazer e desporto náutico.

As obras marítimas são geralmente muito complexas, pois envolvem diversos factores determinantes para o seu sucesso. A escolha assertiva de um determinado tipo de solução a implementar é de vital importância, uma vez que esta escolha pode ter influência em distintos parâmetros, como a movimentação de sedimentos, a hidrodinâmica e a ecologia da região, entre outros.

Assim sendo, neste trabalho são apresentados os diferentes tipos de obras marítimas, as suas funções, os objectivos de cada um deles, bem como alguns dos seus métodos construtivos, demonstrando-se ainda como as condições locais podem invalidar a escolha do tipo de estrutura que à partida poderia ser a mais óbvia, apontando-se, sempre que possível, algumas formas de contornar tais situações adversas. Foi aqui dada maior ênfase às estruturas de acostagem, por ter sido este o tipo de estrutura que motivou o desenvolvimento deste estudo, tendo como caso de estudo o porto de abrigo da Ilha do Porto Santo.

No Capítulo 2, são referidos os principais factores envolvidos no planeamento e na concepção de projectos de engenharia costeira e marítima, sendo nele mencionadas algumas metodologias capazes de criar soluções alternativas, a possibilidade de optimização dos projectos com o emprego de modelos em escala reduzida e modelação numérica, bem como a quantificação dos riscos neles envolvidos.

Os tipos e funções das estruturas costeiras e marítimas são expostos no Capítulo 3, contendo o Capítulo 4 uma descrição dos métodos construtivos utilizados nas obras marítimas de acostagem.

Devido à sua importância nas obras costeiras e marítimas, os tipos de blocos de betão comummente utilizados estão detalhados no Capítulo 5.

O Capítulo 6 contém uma descrição e apreciação da obra de reabilitação do porto de abrigo da Ilha do Porto Santo, no Arquipélago da Madeira, adoptada como caso de estudo, sendo nele equacionados os principais temas abordados nos capítulos anteriores, descrevendo-se o estado das estruturas previamente existentes, os estudos preliminares realizados para sua recuperação, o planeamento da obra, os métodos construtivos adoptados, os tipos e as quantidades de materiais empregues, bem como os meios materiais e humanos mobilizados.

As principais conclusões deste estudo estão sumarizadas no Capítulo 7, sendo nele ainda apresentadas algumas sugestões de trabalho futuro.

No Anexo A, são apresentadas as principais formulações empregues no dimensionamento dos elementos de protecção contra a acção das ondas do mar.

Finalmente, no Anexo B, estão descritos os materiais usualmente aplicados nas obras marítimas, dando-se ênfase às suas características físicas, mecânicas e químicas, às formas de aplicá-los e aos cuidados a ter no seu emprego, bem como aos efeitos da acção dos agentes aos quais os mesmos estão expostos.

2 FACTORES DE PLANEAMENTO E CONCEPÇÃO DE PROJECTOS DE ENGENHARIA COSTEIRA E MARÍTIMA

O projecto e a execução de obras costeiras, marítimas e portuárias apresentam grande complexidade, por exigirem a utilização conjunta de saberes técnicos e científicos oriundos de diferentes áreas do conhecimento, de entre as quais pode destacar-se a engenharia civil, a engenharia naval, a engenharia do ambiente, a física, a geologia, a matemática, a meteorologia, a hidráulica marítima e a oceanografia física.

Tais obras podem ter diferentes funções, incluindo, entre outras, a de propiciar melhores condições para as operações de navegação, tanto no caso de portos comerciais quanto de recreio, a de edificar instalações de serviço e terminais para granéis líquidos ou sólidos e a de atenuar possíveis impactes ambientais, por meio do controlo dos fenómenos de erosão e movimentação de sedimentos e pela prevenção de inundações em zonas costeiras, salvaguardando vidas e bens materiais das populações que vivem nas regiões litorâneas, sendo os projectos destas obras concebidos de modo a assegurar o correcto cumprimento das funções a que se destinam durante um período de vida definido tendo em conta factores económicos [30].

Nos projectos costeiros, a maior dificuldade prende-se geralmente com o controlo da erosão, tendo como factores preponderantes para o projectista os efeitos hidrodinâmicos, a geologia e a morfologia da costa e a estabilidade da estrutura a ser construída.

Antes do mais, importa tentar definir o que se entende por costa, devendo esta ser entendida como a zona de interface que se inicia no mar e prolonga-se até ao primeiro relevo mais acentuado em terra [59], possuindo a mesma uma largura dependente de factores geográficos e da dinâmica oceânica e sendo a posição da linha de costa, a interface entre a terra e a água, igualmente variável ao longo do tempo.

No desenvolvimento de projectos em zonas costeiras, é imperativo ter em conta diversos parâmetros, nomeadamente a hidrodinâmica a que está sujeita a costa, em especial as características das correntes, das ondas e das marés, bem como os ventos e o histórico tendencial meteorológico, com especial atenção às tempestades de inverno, os processos a utilizar, tendo em conta, em todas as ocasiões, que o ambiente tem que ser protegido, e as condições sociopolíticas, expressas pelas leis em vigor e pelas expectativas de desenvolvimento da zona em questão, que possam ter influência, em termos económicos, na concretização do projecto [79].

No caso de obras marítimas de acostagem, objecto deste estudo, deve ser considerado como valor de referência, no que se refere às correntes, a velocidade medida no local de construção da estrutura portuária marítima. Em relação aos movimentos ondulatórios, estes devem ser medidos o quão próximo possível da zona de implantação da estrutura portuária, de modo a estimar adequadamente os esforços a que a estrutura estará submetida. As marés e níveis de água devem igualmente ser medidas na zona de execução da obra portuária, devendo também ser tidas em conta as tendências de longo prazo em termos de variação do clima e do nível do mar. A intensidade com que o vento poderá atingir a estrutura precisa ser também estimada, devendo este ser idealmente medido no local de construção da estrutura de acostagem a uma altura de 10 m acima da superfície ou, então, ajustado para tal altura de referência.

No projecto de obras portuárias, além das condições do terreno e dos parâmetros ambientais antes descritos, devem também ser tidas em atenção as possíveis solicitações [2], isto é, devem ser consideradas as forças provocadas pela atracação e amarração dos barcos e navios, bem como as cargas permanentes e móveis e as possíveis sobrecargas.

2.1 Planeamento e projecto

O planeamento e o projecto de uma obra costeira obedecem a procedimentos e princípios lógicos quase universais, que independem do local, do tipo de projecto e das suas dimensões, tendo como objectivo fundamental a realização de uma obra funcional, economicamente viável, esteticamente aceitável, ambientalmente não agressiva e exequível dentro dos prazos estipulados.

Quando se inicia o planeamento de uma obra costeira, os engenheiros envolvidos devem estar receptivos a ouvir e a observar, devendo inteirar-se por completo das condições que apresenta o local de implantação da obra e nunca ir com ideias pré-definidas ou com soluções pré-concebidas de como será o projecto final. Uma das maneiras indicadas para proceder a um bom planeamento é se autoconfrontar ou confrontar a equipa de projecto com questões básicas e não menos importantes, por vezes de difícil resposta, como, por exemplo, "Que tipo de clima tem-se?", "Quais as condições marítimas?", "Qual é o problema?", "Que tipo de solo?", "Que solução implantar?", "Qual a finalidade?" e, paralelamente, desenvolver uma investigação profunda de modo a se inteirar da realidade [52]. Para responder a estas e a outras questões sobre o planeamento de obras costeiras, que de certa forma são específicas de determinadas áreas, muitas vezes são precisos técnicos de diferentes especialidades credenciados para o desenvolvimento de uma abordagem criteriosa. Dependendo do tipo, das particularidades e da dimensão da obra, estes podem incluir, entre outros, engenheiros especializados em áreas como hidráulica, estruturas, geotecnia, topografia e vias de comunicação, biólogos, geólogos, oceanógrafos e meteorologistas.

Após escolhido o melhor local para a implantação da obra e terem os diferentes especialistas exposto as suas opiniões e dado o seu parecer técnico, é provável que seja encontrada uma solução viável e satisfatória para a obra, em todos os seus aspectos, incluindo, dentre outros, a especificação do tipo de estrutura a construir e os diferentes materiais e tipos de blocos a serem utilizados — descritos em detalhe no Anexo B e no Capítulo 5, respectivamente —, de modo a que todas as partes interessadas vejam as suas pretensões adequadamente satisfeitas.

Da mesma forma que devem ser elaborados planos alternativos aquando do decorrer dos estudos iniciais, à medida que a obra decorre devem também ser estudadas outras opções que possam garantir soluções viáveis em caso de imprevistos, sendo estas soluções alternativas globalmente abrangentes obtidas de forma iterativa, por meio da reformulação dos problemas.

Obviamente, num mundo com pessoas mais informadas e instruídas e onde estão cada vez mais disponíveis ferramentas tecnologicamente evoluídas, é natural que todos os projectos de engenharia tenham obrigatoriamente também de cumprir determinados requisitos a nível de impacte ambiental. De salientar aqui que não se trata apenas de não poluir, mas também de interferir o mínimo possível no meio ambiente da região onde a obra será implantada.

A solução encontrada deve ser avaliada e comparada com outras alternativas, devendo ser idealizada em função dos meios, dos métodos e dos materiais disponíveis na região, sob pena de uma solução técnica aparentemente perfeita tornar-se inadequada à realidade local [26].

Hoje em dia, com a tecnologia disponível, de certa forma é possível evitar erros ou catástrofes, desde que esteja disponível instrumentação adequada para a monitorização das obras, de forma a mantê-las sob controlo, podendo tais instrumentos ser empregues, por exemplo, na prevenção de deslizamentos de terras em taludes ou para a indicação de quando é preciso alimentar artificialmente uma praia de areia. Além das inspecções na construção, devem também ser feitas fiscalizações de forma a assegurar que a obra seja executada fielmente conforme definida em projecto ou, ainda, detectar situações em que seja necessário o seu aprimoramento.

O projecto consiste na execução de um conjunto de actividades maioritariamente técnicas que vão ao encontro das necessidades e implicam a definição de diferentes parâmetros, tendo em consideração a segurança e os efeitos ambientais deles decorrentes.

Um projecto é constituído por elementos que envolvem distintas áreas, que se interligam, incluindo métodos de construção, materiais, critérios de manutenção e condicionantes económicas, entre outros. As ligações existentes entre eles são inevitáveis, não sendo possível, por exemplo, escolher um material que, devido às características deste e do local onde será aplicado, não permita efectuar uma manutenção aceitável ou, ainda, escolher um determinado processo de construção se o solo não for aconselhável para tal. Por tal motivo, a solução a implementar deve sempre ter em consideração diversos factores que devem ser conhecidos aos pormenor, abrangendo os aspectos geotécnicos, as características dos materiais, a hidrodinâmica, a movimentação de sedimentos, as condições ambientais da região, as cargas permanentes e móveis solicitadas à estrutura, além de outros factores, incluindo a susceptibilidade de ocorrência de sismos [26].

2.2 Optimização do projecto e estudo de risco

Hoje em dia, os projectos de engenharia são delineados de modo a satisfazer critérios de segurança especificados com base em métodos matemáticos e probabilísticos, de modo a que as estruturas apresentem uma resposta satisfatória quando sujeitas a condições extremas. Os projectos de engenharia costeira e marítima não fogem a esta tendência. Pelo contrário, são cada vez mais usuais os estudos tanto de modelação física quanto numérica, inclusive com a utilização de sistemas computacionais de elevado desempenho para a realização das simulações computacionais mais exigentes e complexas.

Os projectos de grandes dimensões ou que envolvem grandes riscos são usualmente estudados e analisados também em laboratório, com recurso a modelos físicos reduzidos, como o mostrado na Figura 2.1, que simulam a realidade tanto quanto possível e com os quais é possível obter informações sobre os rumos, períodos e alturas das ondas, a quantificação dos riscos inerentes à acção da agitação marítima, a forma como a estrutura se comporta quando solicitada, a movimentação dos sedimentos e a navegação, atracação e movimentação de cargas em portos, conseguindo-se, desta forma, optimizar as soluções idealizadas [53].

Figura 2.1 – Exemplo de um modelo físico de uma obra marítima.

As análises estatísticas e probabilísticas são igualmente aliadas dos projectistas, sendo por meio destas que muitas decisões são tomadas e se determinam as melhores soluções para as obras marítimas, apesar das muitas incertezas que possam existir. Estes estudos objectivam caracterizar a agitação marítima e prever as variações nas suas características, as variações do nível das águas do mar, a energia das correntes e intensidade dos ventos.

Ainda que tais estudos tenham sido bem conduzidos e que os projectos a que serviram de base estejam bem estruturados, pode acontecer que, em situações ambientais extremamente adversas, tanto as intensidades quanto os níveis previstos sejam ultrapassados, existindo nesta situação a possibilidade da estrutura, que foi projectada para resistir até certo ponto, não suporte as acções extremas a que está anormalmente submetida e acabe por ceder em alguns pontos. Por exemplo, no caso de um quebra-mar constituído por blocos de betão estar submetido a condições anormalmente adversas, estes podem sofrer danos ou mesmo partirem-se, porém, ainda que em más condições, podem tais blocos

continuar a proteger minimamente a estrutura contra a acção das ondas, o que leva a concluir que a resistência e o desempenho dos materiais que constituem as obras costeiras não são constantes ao longo do tempo.

Nem todos os riscos e benefícios são possíveis de prever num projecto de engenharia costeira ou marítima, na medida em que, se por um lado uma determinada configuração pode inicialmente servir perfeitamente, com o passar do tempo, quer por depositação de sedimentos, quer por erosão ou outro factor, esta pode não conseguir manter um aproveitamento similar ao inicial, deixando assim de desempenhar adequadamente as funções para a qual foi concebida.

Um projecto será inevitavelmente mais bem conseguido sempre que este estiver assente num estudo profundo do local da sua implantação, nomeadamente se as zonas adjacentes forem também, tanto quanto possível, conhecidas e exploradas, evitando assim possíveis transtornos devidos a incertezas, que podem implicar falhas graves. Por exemplo, no caso da construção de um porto num determinado local, os dados recolhidos podem mostrar que a quantidade de areia naquela zona, ao longo do tempo, é sensivelmente a mesma, porém é conveniente saber se esta é a mesma porque o mar não é capaz de arrastá-la ou se o aparente equilíbrio é mantido pelo transporte contínuo de sedimentos de um lado para o outro. Neste caso, a construção de um porto pode provocar uma barreira para a movimentação natural de sedimentos que existia anteriormente à sua construção, podendo tal situação provocar alteração das configurações da praia tanto a sotamar quanto a barlamar e, eventualmente, ser necessário recorrer periodicamente à alimentação artificial da praia. Outro exemplo, talvez mais grave, seria o caso em que um projecto, executado com a pretensão de proteger uma dada zona e que o fizesse com sucesso, pudesse causar uma alteração significativa na dinâmica local que acabasse por deslocar os riscos antes existentes para uma região próxima, outrora mais calma.

Porém, mesmo com os métodos determinísticos actualmente utilizados para o dimensionamento e a optimização técnica de estruturas costeiras e marítimas, todo o projecto tem de ser justificado, apesar de, por vezes, sua destinação final

poder ser desviada daquela prevista em decorrência de pressões de natureza sociopolítica, económica, ambiental ou estética, sendo fundamental que a experiência dos engenheiros especialistas em obras marítimas seja tida em conta e transmitida aos promotores e aos demais elementos intervenientes das áreas antes referidas.

Sendo os projectos de obras costeiras e marítimas muito complexos, devido aos inúmeros factores a elas inerentes, é razoável fazer uma selecção dos parâmetros indispensáveis ao projecto em causa, denominados variáveis-chave, e manter o foco nessas variáveis, que são as que realmente irão influenciar nos mecanismos de actuação e no dimensionamento do projecto em questão.

Uma abordagem que tenha o risco como um dos principais parâmetros será seguramente mais racional, uma vez que irá proporcionar uma melhor base de informação para a avaliação da relação custo-risco, permitindo com isto escolhas e decisões mais adequadas para a elaboração de um projecto mais capaz.

Existem essencialmente duas análises distintas que podem ser consideradas no estudo de risco nos projectos de obras costeiras e marítimas, nomeadamente a análise com base na frequência e análise de abordagem ao ciclo de vida [28]. No primeiro caso, trata-se de uma análise que tem como fundamento a combinação entre a frequência de ocorrência e a magnitude de um dado evento, tendo em conta as variáveis-chave para o projecto em questão. A abordagem ao ciclo de vida, por sua vez, é uma análise mais apropriada às construções costeiras e marítimas, tendo como objectivo acelerar os parâmetros que se prevêem influenciar na integridade da estrutura, consistindo assim na exposição da estrutura a variadas acções, às quais se espera que a estrutura reaja de forma positiva ao longo da sua vida útil, aplicando-se estas variáveis de acordo com a probabilidade de realmente virem a acontecer num determinado número de ciclos.

É comum projectar estruturas, ditas temporárias, para uma duração de cerca de 20 anos, para 50 a 100 anos no caso de obras de protecção de estruturas costeiras, e de 100 a 1000 anos para estruturas de protecção contra inundações, sendo ainda

de referir que a escolha dos materiais irá ter sempre uma forte influência na durabilidade da estrutura [30].

Durante os ciclos de vida das estruturas, é comum que estas sofram distintas acções, sejam sujeitas a eventos extremos com diferentes intensidades e fiquem expostas a processos contínuos de erosão, sendo reabilitadas quando necessário objectivando recuperá-las dos danos destas acções, e que praias mais susceptíveis à erosão sejam alimentadas periodicamente. A análise do ciclo de vida das estruturas costeiras e marítimas permite também conferir se uma determinada solução é economicamente viável. Por exemplo, se uma estrutura é constantemente submetida a tempestades, deverão ser tidos em conta os custos necessários para a sua reparação ou, no caso de praias submetidas a intensos processos erosivos, deverão ser contabilizados os custos para alimentá-las artificialmente e considerada a periodicidade com isto terá de feito. O tempo é, portanto, um elemento capital numa análise do ciclo de vida, dele dependendo a estimação e a flexibilização do ciclo de vida e a limitação das construções.

A análise de risco de uma obra costeira pode ser enquadrada na fase de planeamento, cujas etapas, antes mencionadas, são resumidamente as seguintes:
– Constatação dos problemas e conjunturas;
– Perspectivação no caso de nada ser feito;
– Criação de planos alternativos;
– Avaliação dos efeitos provocados pela solução escolhida;
– Comparação entre planos opcionais;
– Escolha do plano mais adequado.

Assim, é imperativo conhecer detalhadamente a zona de implantação do projecto costeiro, conhecer o histórico do local ao nível das acções a que estará sujeita a estrutura, avaliar o que se sucederia caso não existisse uma obra prevista para o local, sendo importante envolver nesta avaliação acções humanas e também ambientais, bem como analisar os riscos, podendo esta análise ajudar na dissipação de dúvidas na escolha do plano mais adequado e contribuir para o aperfeiçoamento de um projecto, testando uma solução com diferentes elementos estruturais [28, 30].

3 PRINCIPAIS TIPOS E FUNÇÕES DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS

As estruturas marítimas têm vários propósitos, sendo muitas vezes aplicadas como medida de defesa contra a erosão e a inundação da costa. Estas estruturas, ao impedirem a livre acção das ondas do mar e condicionarem a circulação de sedimentos, protegem praias, costas, bacias e portos e proporcionam a estabilização dos canais de navegação.

3.1 Diques

Os diques (em inglês, *sea dikes*) são estruturas que têm como principal função zelar pela protecção das zonas de cotas mais baixas contra as inundações.

Os diques assentam forçosamente as suas duas extremidades sobre a terra e apresentam uma cobertura protectora, designada por revestimento, como mostra o exemplo da Figura 3.1, que pode ser em asfalto, betão, rochas ou mesmo constituída por vegetação bem enraizada, tendo por objectivo garantir a estabilidade da obra. Por debaixo desta "manta" de protecção, os diques são usualmente construídos com uma diversidade de materiais finos, como areia e terra, sendo por isto conveniente revestir o dique nas zonas mais susceptíveis à erosão. A estrutura deve apresentar um ligeiro declive em direção ao mar, a fim de reduzir o período preparatório das ondas e o efeito de enrolamento das mesmas [43]. Para o dimensionamento de um dique, a principal condicionante é a sua altura [2], devendo esta ser suficiente para garantir a segurança e a resistência à incursão das ondas em alturas de níveis de água máximos.

Figura 3.1 – Dique (extraído de [31]).

3.2 Esporões

Os esporões (*groins*) são estruturas usualmente implantadas perpendicularmente à costa, de formas estreitas e quase sempre rectas, como ilustra a Figura 3.2. Os esporões têm como principal função impedir a livre circulação dos sedimentos no sentido longitudinal, protegendo, desta forma, a costa da erosão. A eficácia que um ou mais elementos destes têm pode ser determinada pela percentagem de material sólido que fica retida a barlamar dos esporões.

Para dimensionar este tipo de estrutura, é necessário ter em conta vários itens, incluindo, além dos parâmetros hidrodinâmicos, o comprimento, a altura e a permeabilidade a adoptar para os esporões, o tempo de enchimento e o espaçamento entre eles, bem como as mudanças esperadas ao nível da costa [2].

As ondas têm um papel primordial no transporte dos sedimentos e, no caso destas apresentarem uma declividade considerável, farão com que existam mais sedimentos em suspensão, enquanto que as ondas de menor declividade irão contribuir para um transporte de sedimentos essencialmente por arrastamento.

Os esporões também podem ser utilizados para reter materiais de praias artificiais ou evitar a deposição de sedimentos em zonas específicas, como, por exemplo, junto à foz de um rio. Outra utilidade dos esporões é o seu emprego para atenuar ou desviar fortes correntes de maré, além de poderem ser também utilizados para diminuir a reflexão das ondas.

Os esporões, na sua grande maioria, são construídos com rochas empilhadas de forma regular umas sobre as outras, com enrocamentos ou, ainda, num sistema de gabiões, devendo ser capazes de suportar as cargas provocadas pelas ondas. Porém, podem também ser construídos em madeira, com sacos de alta resistência enchidos com argamassa ou com estacas-prancha preenchidas por betão ou agregados [2].

Estas estruturas devem estender-se desde a posição extrema em terra atingida pela água do mar até à zona de início da rebentação. Além disto, para que possam ser funcionais para além da zona de movimentação normal da praia, devem possuir uma altura superior àquela correspondente ao nível máximo da água, de modo a evitar o flanqueamento da estrutura [30].

A estrutura, com tal extensão, ainda permite uma determinada proporção de transporte longitudinal de sedimentos durante os períodos de maior agitação ondulatória. Apesar da zona de rebentação variar com o nível do mar, com a altura das ondas e com as feições batimétricas junto à praia, consideram-se como esporões longos os que se estendem para além da zona de rebentação e como curtos aqueles que se prolongam apenas até um ponto próximo da zona de rebentação. Os esporões também podem ser classificados como altos ou baixos, de acordo com a altura que apresentam, característica que tem influência directa na permissão do transporte de sedimentos sobre a estrutura.

Uma solução economicamente pertinente e igualmente viável na maioria das vezes é considerar esporões com cristas "inclinadas", de forma a manter um aspecto fiel ao perfil da praia, em vez de manter toda a extensão da crista à mesma altura.

Existem esporões que são construídos com o propósito de permitir a passagem de uma fracção dos sedimentos, nomeadamente dos mais finos, denominando-se estes esporões "permeáveis". A diferença entre os esporões baixos e permeáveis e entre os altos e impermeáveis é que os primeiros levam a uma redução mais acentuada da reflexão das ondas e à formação de correntes de retorno de menor intensidade [43].

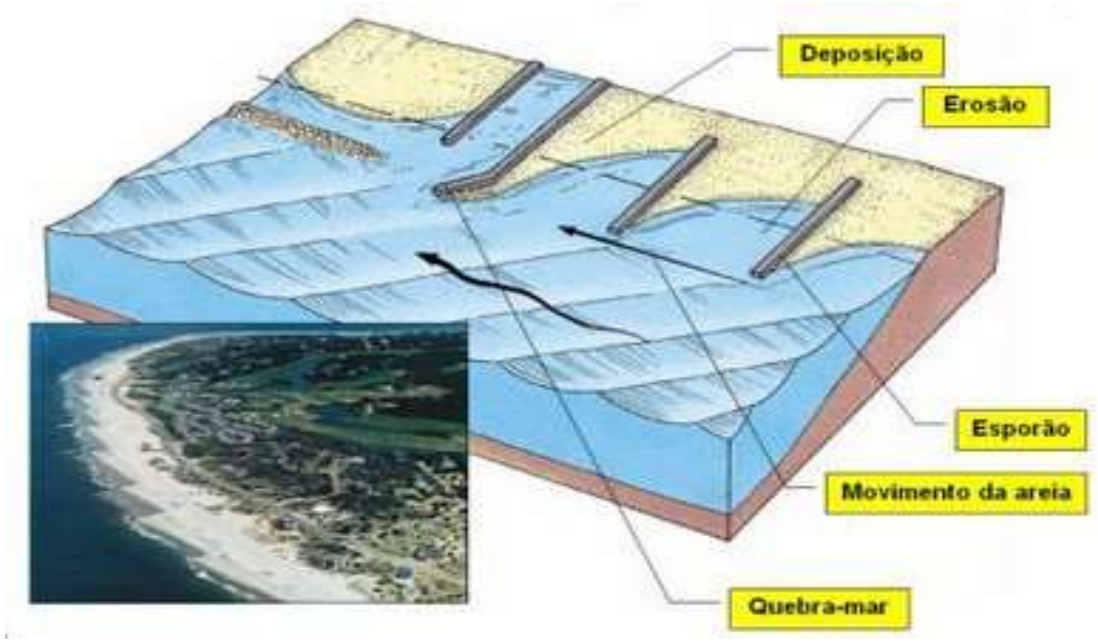

Figura 3.2 – Campo de esporões (extraído de [33]).

3.3 Paredões

Paredões (*seawalls*) são estruturas implantadas em zonas terrestres, geralmente paralelas à linha de costa e com paredes de face pouco inclinada ou mesmo vertical, conforme é possível observar na Figura 3.3, concebidas em betão armado ou betão ciclópico, tendo como principal função impedir o galgamento do mar e a inundação dos terrenos por si protegidos em decorrência da acção de grandes

ondas e marés de tempestade, reforçando assim a segurança das pessoas, casas e outras infraestruturas situadas junto à costa.

Este tipo de paredes originam um acentuado perfil na base da estrutura, tornando-a assim um alvo do impacto das ondas e aumentando a erosão do leito do mar imediatamente à frente da estrutura, o que por vezes obriga ao seu reforço. Nos casos em que a erosão é mais explícita, pode ser usado, em simultâneo, outro tipo de sistema de controlo de praias, como, por exemplo, os esporões [77].

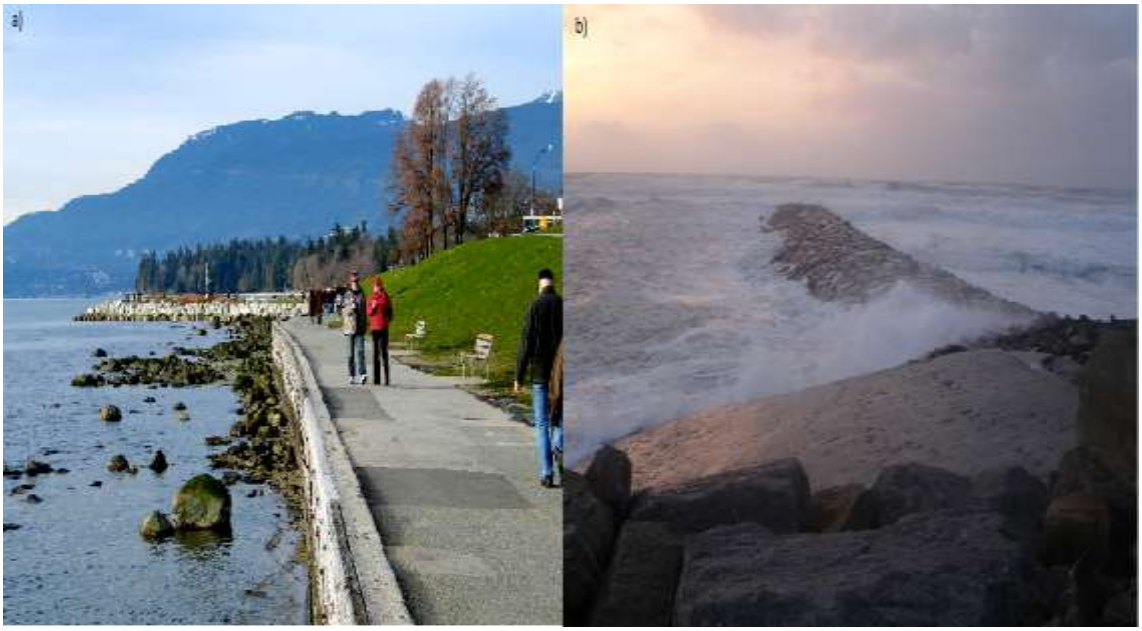

Figura 3.3 – a) Paredão e b) paredão e esporão (extraídos de [32] e [34]).

3.4 Revestimentos

Os revestimentos (*revetments*) são estruturas muito idênticas aos diques, implantadas em zonas terrestres com a finalidade de proteger o contorno da costa da erosão. Estas estruturas são tipicamente compostas por um revestimento em betão, pedra ou asfalto, apresentando igualmente uma inclinação em direcção ao mar [43], conforme se pode observar na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Revestimento em betão (extraído de [35]).

3.5 Paredes verticais

As paredes verticais (*bulkheads*) são muros de contenção convencionalmente construídos ao longo da costa marítima a fim de evitar erosão e deslizamentos de terras provocados pela acção das ondas, conforme mostra a Figura 3.5. Como segunda funcionalidade, podem ajudar a evitar inundações, embora nunca sejam construídos com este propósito.

Estas paredes podem ser construídas com plástico, metal, madeira ou betão, podendo ser estabilizadas com recurso a tirantes ancorados e, ainda, no caso da opção pelo betão, adionalmente consolidadas com o emprego de estacas com alguma profundidade [30, 77].

Figura 3.5 – Parede vertical formada por estacas-prancha (extraído de [36]).

3.6 Quebra-mares destacados

Os quebra-mares destacados (*detached breakwaters*) são elementos singulares ou múltiplos posicionados paralelamente à costa e a certa distância desta, a exemplo da Figura 3.6. Têm como principal função reduzir a erosão provocada pelas ondas sobre a costa, interceptando primordialmente as ondas incidentes e as ondas refractadas que transportam sedimentos para fora da costa. Este tipo de quebra-mar é implantado a profundidades de água superiores à dos esporões, sendo o seu espaçamento ao longo do perfil a proteger da ordem do seu comprimento individual.

Cada quebra-mar influencia na defesa da costa, visto que tem a função de dissipar a energia das ondas, reduzindo-a. A soma do trabalho individual prestado por cada elemento, no global, reduz de forma significativa a erosão da praia. Os sedimentos existentes na praia depositam-se no tardoz dos quebra-mares, assentando numa zona em que a energia das ondas é menor.

De forma semelhante aos esporões, este tipo de quebra-mar tem também a capacidade de controlar a distribuição dos sedimentos ao longo da costa. Para tal, devem ser tomadas medidas em relação ao último quebra-mar, devido à movimentação dos sedimentos entre eles, podendo a solução passar pela introdução de uma secção de transição, reduzindo gradualmente os quebra-mares e aproximando-os da costa [28].

Os quebra-mares destacados são geralmente constituídos por enrocamentos, embora possa ser opção o emprego de blocos ou caixotões de betão, bem como estacas metálicas ou em madeira, no caso de zonas mais abrigadas.

Estas estruturas são, por vezes, imersas na sua totalidade, o que faz com que contribuam para o rebentamento precoce das ondas, além de permitirem que os sedimentos possam galgá-las mais facilmente. Ao serem submersos, desde logo constituem um factor de risco, tanto para os banhistas como para as embarcações. Esta solução tem a seu favor a questão da estética paisagística, uma vez que o quebra-mar não é visível acima da superfície do mar [2].

Tal como acima referido, os quebra-mares destacados são úteis para a redução da erosão das costas marítimas, além de serem eficazes na protecção de praias artificiais. Têm como desvantagem o facto de, em caso de deposição em excesso de sedimentos, criarem barreiras à livre circulação e renovação da água, podendo assim contribuir para o aumento da poluição junto à costa. Por questões económicas, estes quebra-mares não são aconselhados para zonas de muita profundidade [43].

Figura 3.6 – Quebra-mar destacado (extraído de [37]).

3.7 Quebra-mares recife

Os quebra-mares recife (*reef breakwaters*) são estruturas submersas paralelas à costa, podendo ser longas ou curtas, de cristas largas ou estreitas e mais ou menos profundas, dependendo do projecto em questão [77]. Têm como missão reduzir a acção das ondas sobre a costa, obrigando à sua rebentação precisamente na zona em que estão implantados, como ilustra a Figura 3.7, forçando-as desta forma a perderem parte da sua energia e a atingirem a costa de forma mais inofensiva.

São estruturas geralmente constituídas por pedregulhos ou em betão, podendo ser projectadas para permanecerem imóveis ou remodelarem-se sob a acção das ondas. Tal como os quebra-mares destacados submersos, podem acarretar problemas para nadadores e embarcações, por estarem completamente abaixo da superfície do mar.

Figura 3.7 – Quebra-mar recife (extraído de [38]).

3.8 Soleiras submersas

As soleiras submersas (*submerged sills*) funcionam como uma barreira estrutural impermeável, com uma determinada altura e implantada a certa distância da costa, tendo algumas semelhanças com os quebra-mares recife. Funcionam como elementos opositores à livre circulação dos sedimentos junto à costa, produzindo uma descontinuidade no perfil da praia e, com isto, conseguindo retê-los no espaço entre a costa e o local onde estão situados, formando assim uma zona mais estável, mais elevada e mais larga do que a que existiria caso não estivessem presentes. Este tipo de estruturas é um habitué nas praias artificiais, que naturalmente não teriam um perfil capaz de reter o areal. A geometria destas estruturas é de vital importância, uma vez que podem influenciar também as correntes costeiras,

na medida em que, no caso da estrutura apresentar uma crista longa, esta contribuirá para a redução das correntes mais fortes no seu tardóz, sendo inverso o resultado caso a crista seja curta. Estas estruturas podem variar no que toca aos materiais que as constituem, podendo ser pré-fabricadas em betão ou construídas *in situ* com material rochoso, conforme a Figura 3.8 exemplifica. Da mesma forma que as soleiras submersas e os quebra-mares recife, representam um risco não visível para nadadores e embarcações, devido ao seu posicionamento submerso.

Figura 3.8 – Colocação de rochas para a formação de soleiras submersas (extraído de [39]).

3.9 Alimentação de praias e construção de dunas

A alimentação de praias e a construção de dunas (*beach nourishment and dune construction*) constituem uma solução pertinente quando o objectivo é a protecção costeira contra a erosão. Um projecto deste tipo permite que seja criada ou mantida uma praia artificialmente — isto é, por acção antrópica, com auxílio de máquinas, situação mostrada na Figura 3.9 — tratando-se, portanto, de um método que prevê a alimentação das zonas da praia sujeitas à erosão com material arenoso, compensando assim a sua falta. No caso da criação de uma praia, esta pode ser

para a formação de um local de lazer, para a criação de uma camada protectora contra a erosão ou, ainda, com ambos os propósitos.

O material a colocar nas partes erodidas, deve, sempre que possível, ser o mesmo ou um material com características semelhentes, devendo, no entanto, ser estudadas as causas que provocaram tal erosão, uma vez que a areia depositada também poderá ser alvo de um processo de erosão, o que irá elevar a custos de manutenção. O enchimento da praia também pode servir para a sua protecção, ao evitar, em determinados casos, deslizamentos de material sobre a costa [30].

A construção de dunas consiste num amontoar de areia, objectivando formar uma barreira protectora capaz de substituir as dunas naturais ou artificiais que tenham sido destruídas aquando de tempestades severas. É aconselhável aplicar redes, vedações ou vegetação sobre as dunas, de forma a garantir a retenção da areia de maneira mais eficaz quando expostas aos ventos [43]. No entanto, a opção pela alimentação da praia pode implicar custos elevados, dependendo da disponibilidade e do tipo de material a ser aplicado.

Figura 3.9 – Alimentação artificial de uma praia (extraído de [40]).

3.10 Quebra-mares

Os quebra-mares (*breakwaters*) são elementos concebidos para travar a acção das ondas numa determinada área. São usados para proteger a costa, sendo posicionados de forma paralela à mesma, como evidencia a Figura 3.10. Esta protecção é conseguida devido às características destas estruturas, que dissipam e reflectem a energia das ondas que as atingem [2]. Desta forma, os quebra-mares são utilizados nos portos com o objectivo de tirar partido das suas características e possibilitar zonas de fraca ondulação, facilitando com isto a amarração de barcos, as operações de movimentação de cargas e a manutenção de navios, além de assegurarem a protecção das instalações portuárias propriamente ditas [26].

Existem vários tipos de quebra-mares, com características adequadas a diferentes fins. Por exemplo, na protecção de portos, os quebra-mares devem ser escolhidos de acordo com o seu tamanho e forma, com a área a proteger e, sobretudo, com as características da ondulação e a direcção das correntes marítimas [43], factores estes que influenciam no seu projecto.

Estas estruturas costeiras podem ter um custo elevado, no caso de se destinarem à protecção de locais vulneráveis à acção de ondas de maior energia ou que apresentem grandes profundidades.

Os tipos de quebra-mares mais usuais são os de parede vertical, os de talude e os mistos, a seguir descritos.

Figura 3.10 – Quebra-mar constituído por blocos de betão.

3.10.1 Quebra-mares de talude

O quebra-mar de talude é um tipo de estrutura constituída por blocos de betão ou por elementos rochosos, ilustrada na Figura 3.11, bastante eficaz na dissipação da energia das ondas e de construção e manutenção relativamente simples [43].

Estas estruturas podem apresentar uma configuração semelhante à exemplificada na Figura 3.12, podendo assim o enroncamento ser composto por diversas camadas, consoante o peso que apresentem os blocos em betão ou as rochas, estipulado pelo projectista, formando taludes com inclinações também por este definidas. O enrocamento pode ter um perfil simétrico ou não e ser ou não coroado com uma superstrutura.

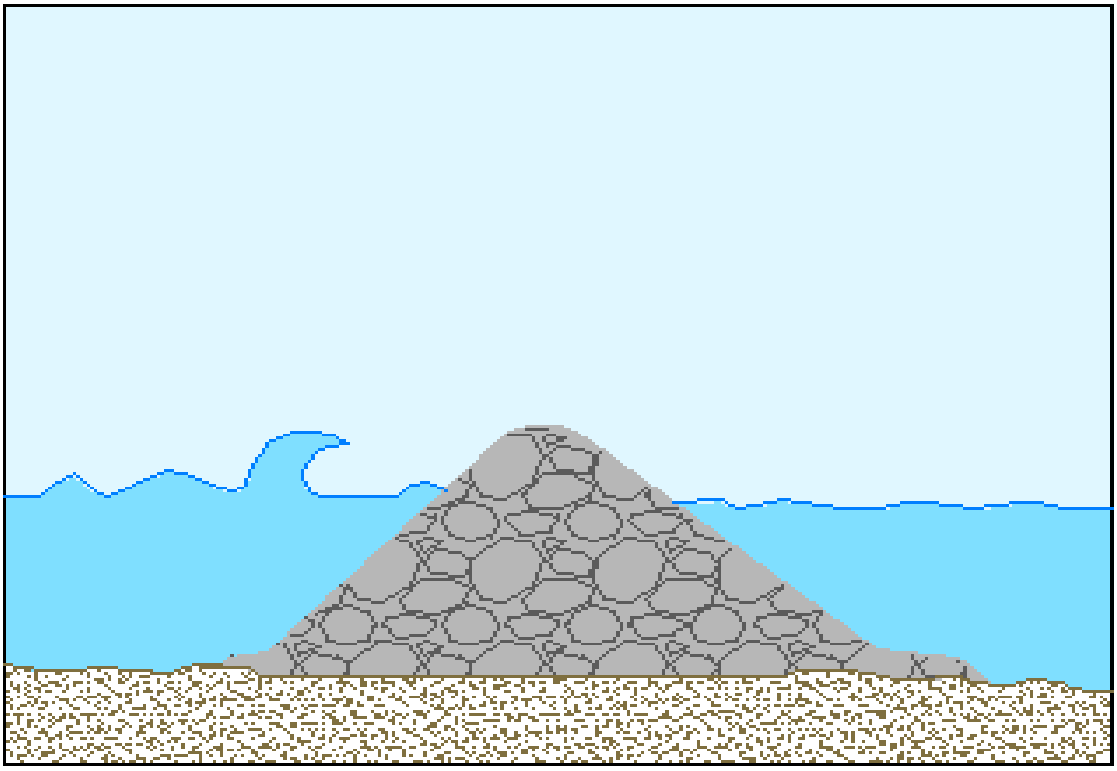

Figura 3.11 – Quebra-mar de talude.

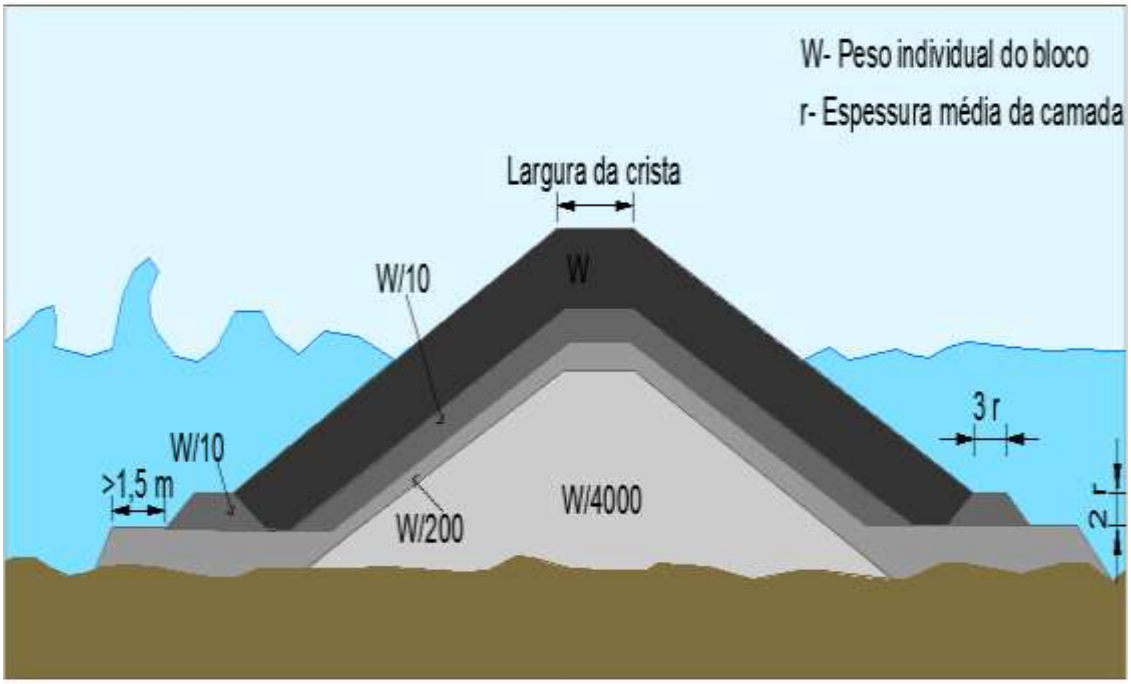

Figura 3.12 – Exemplo de um modelo de enrocamento de várias camadas (adaptado de [77]).

3.10.2 Quebra-mares de parede vertical

Os quebra-mares de parede vertical são, na maior parte dos casos, constituídos por caixotões em betão armado preenchidos com areia, como exemplificado na Figura 3.13, ou ainda por blocos maciços em betão, colocados sobre um enroncamento de regularização. Para uma melhor eficiência na redução da energia das ondas, estes devem apresentar um declive na parte superior, sendo ainda necessário que a parede frontal ostente perfurações para permitir a dissipação da energia das ondas. Por questões económicas, tais quebra-mares não devem exceder os 15 m de altura [2, 43].

Os quebra-mares de parede vertical podem ser construídos para a protecção de infraestruturas situadas em zonas costeiras contra tsunamis ou para a regulação dos processos de sedimentação, podendo ainda contribuir para a melhoria das condições de manobrabilidade das embarcações no acesso aos portos.

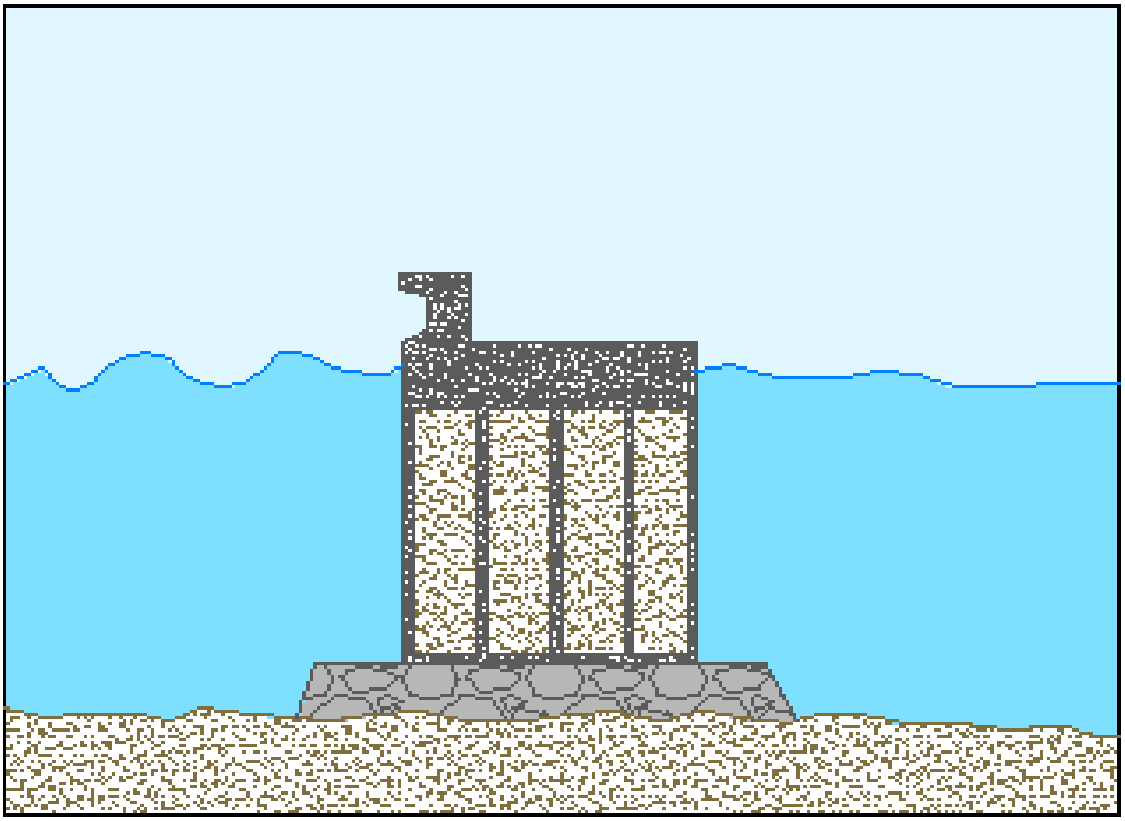

Figura 3.13 – Quebra-mar vertical em betão armado preenchido por areia.

3.10.3 Quebra-mares mistos

Os quebra-mares mistos, tal como o seu nome indica, são uma junção do quebra-mar de talude com uma superstrutura [2]. São compostos por uma parte inferior submersa, o maciço de enrocamento, o qual é encabeçado por uma superstrutura destinada à protecção contra a passagem das ondas, configuração perceptível na Figura 3.14. Esta conjugação acontece essencialmente por questões económicas, quando o local de construção do quebra-mar apresenta uma profundidade significativa ou em fundos marinhos de baixa resistência. Conforme o nível da água e a altura das ondas, este tipo de estrutura marítima pode provocar tanto a reflexão como a dissipação da energia das ondas [43].

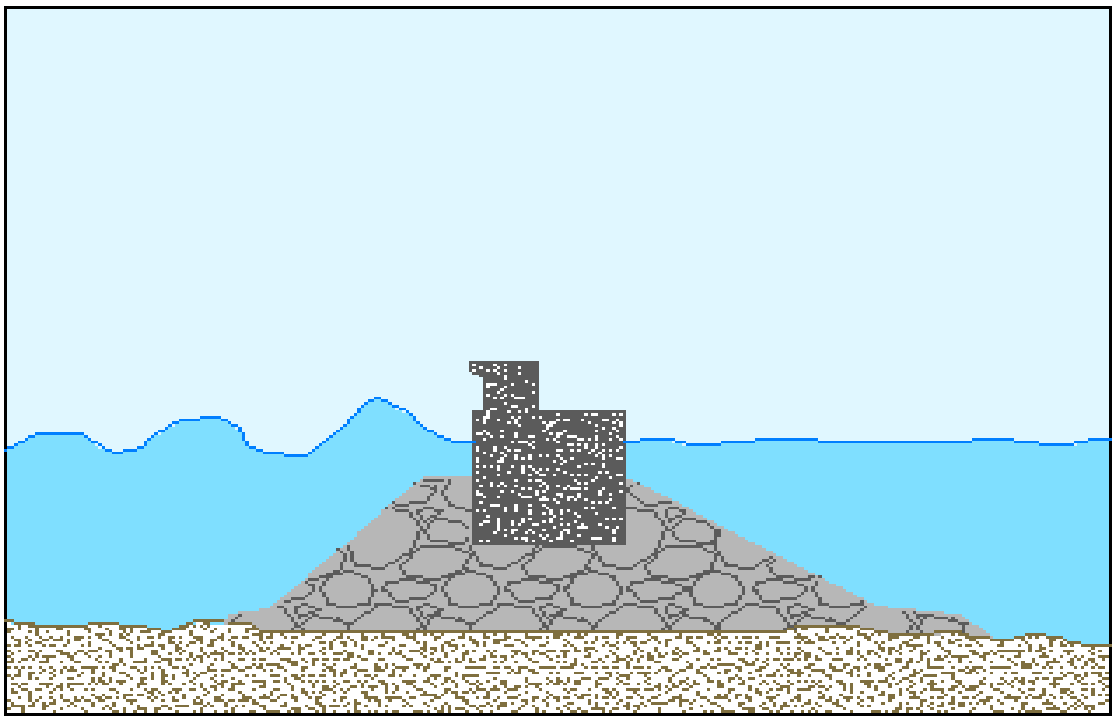

Figura 3.14 – Quebra-mar misto.

3.11 Quebra-mares flutuantes

Quebra-mares flutuantes (*floating breakwaters*) são estruturas igualmente utilizadas para a dissipação da energia das ondas, possuindo características que proporcionam resultados satisfatórios quando implantadas em zonas sujeitas a

ondas com energia relativamente baixa [77]. Os quebra-mares flutuantes são usualmente constituídos por elementos celulares em betão, como ilustrado na Figura 3.15, sendo posicionados em zonas destinadas à protecção de marinas, como as docas flutuantes.

Figura 3.15 – Quebra-mar flutuante em betão (extraído de [42]).

3.12 Molhes

Molhes (*jetties*) são estruturas longas e estreitas concebidas com o intuito de estabilizar canais de navegação junto a foz dos rios e embocaduras, criar locais de adequados de atracação que facilitem as manobras das embarcações, constituir zonas de abrigo contra ondas de tempestades e, ainda, proporcionar abrigo contra as correntes marítimas desfavoráveis na zona onde estão implantadas [77].

Um molhe é um tipo de obra de engenharia costeira que apresenta características semelhantes a um pontão ou a uma estrutura estendida em direcção ao mar, sendo constituídos por blocos de betão ou rochas, emergindo da superfície aquática, como exemplifica a Figura 3.16.

Figura 3.16 – Molhe (extraído de [62]).

3.13 Muros guias

Muros guias ou muros de aproximação (*training walls*) são paredes usualmente construídas com a utilização de estacas prancha, rochas ou betão [43], que têm como principal objectivo conduzir o fluxo de água existente junto à costa, situação exemplificada na Figura 3.17, tendo desta forma que possuir características de impermeabilidade para um melhor desempenho.

Figura 3.17 – Muro de aproximação (extraído de [44]).

3.14 Barreiras contra marés de tempestade

Barreiras contra marés de tempestade (*storm surge barriers*) são elementos estruturais de protecção contra inundações provocadas por fortes ondulações ou tempestades. Como funcionalidade, estas barreiras apresentam geralmente uma série de comportas móveis, como ilustrado na Figura 3.18, destinadas a serem fechadas quando se prevêem tempestades que provoquem uma excessiva elevação do nível da água, mantendo-se abertas em caso contrário, de modo a permitir a normal passagem do fluxo de água. Estas estruturas também podem ser empregues para evitar a penetração da água salgada em zonas protegidas predominantemente banhadas por água doce.

As comportas constituintes deste tipo de estrutura podem apresentar movimentos distintos, de correr ou de girar, sendo construídas em aço e assentadas na maior parte dos casos sobre fundações em betão [43].

Figura 3.18 – Barreiras móveis contra marés de tempestade (extraído de [45]).

3.15 Emissários

Emissários (*pipelines*) são tubagens, como a exemplificada na Figura 3.19, que formam condutas com funções distintas, como o escoamento de resíduos provenientes de estações de tratamento de águas residuais e o transporte de água e de combustíveis, nomeadamente o petróleo e gás. São vários os materiais que constituem estas condutas, consoante a finalidade a que se propõem [55]. No caso de se tratar de um abastecimento de água ou de emissários de esgotos de pequeno porte, tubagens em PVC flexível deverão ser suficientes. No caso de serem condutas sujeitas a altas pressões, estas deverão ser rígidas, constituídas por materiais como, por exemplo, o aço com reforços em betão ou, ainda, somente de betão.

Quando estas condutas encontram-se em terminais marítimos ou em locais em que se preveja algum perigo — em decorrência da acção de âncoras, atrito com correntes ou outras colisões — as condutas, para além de deverem ser colocadas a grandes profundidades, no fundo do mar, poderão ser inclusivamente enterradas. Deverão também ser enterradas em zonas de erosão de praia, abaixo do nível máximo previsto de erosão, ou caso sejam previsíveis mudanças significativas no leito marinho.

Figura 3.19 – Emissário (extraído de [46]).

3.16 Estruturas de estacas

Estruturas de estacas (*pile structures*) são estruturas usualmente vistas em obras costeiras, sobretudo na figura de pilar. Estas estruturas direccionam para o solo as cargas que são nelas aplicadas, sofrendo, além disto, as cargas provocadas pelas ondas e correntes, bem como a normal reacção de retracção quando sujeitas a climas frios [41].

Podem ser concebidas para possibilitar a amarração de embarcações, para suportar lojas, restaurantes, guindastes, viadutos ou instalações petrolíferas, conforme mostra a Figura 3.20, entre outras aplicações.

Os materiais a escolher para estes elementos dependem de vários factores, desde logo as cargas a suportar, o clima a que estarão sujeitos e o tipo de solo em que serão apoiados [41]. Tais estruturas podem ser concebidas em madeira tratada, aço ou betão, reforçado com estacas cravadas no fundo do mar, estacas de grandes diâmetros ou até mesmo pilares assentados sobre o solo. Os materiais mais utilizados para a execução das estacas de maior dimensão são o betão ou tubos de aço preenchidos por betão.

Figura 3.20 – Instalação petrolífera sobre estacas (extraído de [47]).

3.17 Protecções contra a erosão

A protecção contra a erosão (*scour protection*), na maioria das vezes, consiste na aplicação de uma cama de pedras sobrepostas sobre uma manta geotêxtil, podendo ainda ser executada em betão ou por meio de elementos plásticos preenchidos com

materiais que a eles se ajustam, como, por exemplo, a areia, situação esta registada na Figura 3.21, sendo que esta última alternativa pode implicar custos de reparação ou substituição.

Apresentam-se como uma solução altamente impermeável, tendo como função proteger a camada onde são aplicadas da acção hidrodinâmica do mar, que muitas vezes está na origem da instabilidade da costa. Podem assim ser uma solução capaz de proteger zonas de praia mais susceptíveis à acção erosiva do mar, em decorrência da acção da agitação marítima conjugada com as marés, correntes e factores climatéricos e ambientais adversos, bem como capaz garantir a estabilidade de estruturas com fundações submersas no fundo do mar.

Esta solução é comumente utilizada em diques, paredões, à volta de pilares, esporões, quebra-mares e em outras estruturas costeiras sujeitas à acção constante e combinada de ondas e correntes marítimas [43].

Figura 3.21 – Protecção contra a erosão por meio de geotêxtil preenchido com areia (extraído de [48]).

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais aplicações dos diferentes tipos de estruturas marítimas e costeiras antes descritos.

Tabela 3.1 – Tipos e funções das estruturas marítimas.

Tipo de estrutura	Principais aplicações
Diques	Protecção contra inundações, por meio de estruturas impermeáveis
Esporões	Protecção contra erosão, através da redução do transporte de sedimentos
Paredões	Protecção contra inundações e galgamentos, por meio de estruturas impermeáveis
Revestimentos	Protecção contra erosão, através de estruturas impermeáveis
Paredes verticais	Protecção contra erosão e deslizamentos de terras, por meio de estruturas impermeáveis
Quebra-mares destacados	Protecção contra erosão, através da redução do transporte de sedimentos e da altura das ondas
Quebra-mares recife	Protecção contra erosão, através da redução da altura das ondas
Soleiras submersas	Protecção contra erosão, através da redução do transporte de sedimentos
Alimentação de praias e construção de dunas	Protecção contra erosão e inundações; criação praias artificiais
Quebra-mares	Dissipação da energia das ondas, evitando a erosão e inundações; criação de zonas calmas de atracação
Quebra-mares flutuantes	Dissipação da energia das ondas
Molhes	Estabilização de canais; protecção contra tempestades; criação de zonas de atracação
Muros guias	Condução do fluxo, por meio de estruturas impermeáveis
Barreiras móveis	Protecção contra inundações; separação de águas
Emissários	Transporte de fluidos
Estruturas de estacas	Transferência de cargas para fundo do mar
Protecções contra erosão	Protecção contra erosão provocada por ondas e correntes

4 OBRAS MARÍTIMAS DE ACOSTAGEM

Este Capítulo foi escrito com o intuito de dar uma ideia geral dos tipos de obras de acostagem existentes, uma vez que, no Capítulo 7, é feito um enquadramento do tipo de estruturas com aquela existente na ilha do Porto Santo.

A escolha do tipo de estrutura para acostagem é algo complexo, visto se tratar de uma escolha motivada por diversos factores, definidos desde logo pelas condições locais, particularmente [2, 26]:

— a profundidade da construção, em função do nível do mar, influencia na escolha do tipo de estrutura a implementar, sobretudo a nível económico, podendo ser necessário um uso excessivo de material, como, por exemplo, numa estrutura gravítica de grande profundidade;

— as condições geotécnicas, uma vez que as tensões admissíveis de um solo podem pender para uma determinada solução, como, por exemplo, no caso de solos incoerentes ou em zonas sísmicas pode ser mais conveniente a utilização de estacas;

— os recursos disponíveis, tanto em termos de materiais quanto de equipamentos, podem viabilizar uma determinada escolha, uma vez que, no caso serem escassos, por circunstâncias orçamentais, elevariam o custo da obra;

— as dimensões do projecto, designadamente a altura total da estrutura e o comprimento e a largura da plataforma pretendida.

O desígnio da construção acarreta parâmetros indicativos acerca dos esforços a que a estrutura de acostagem estará sujeita, nomeadamente [2]:

— esforços solicitantes provocados pela acção das correntes marítimas, ondas e ventos, sendo que a movimentação hidráulica pode ser alterada e minorada com aplicação das soluções descritas no Capítulo anterior;

— os esforços provocados pelas operações de atracação e amarração dos diferentes tipos de embarcações previstas;

— os impulsos do solo e do nível freático;

— os esforços solicitantes pelas estruturas de serviço e pelas acções provenientes da movimentação de cargas e de passageiros, incluindo os equipamentos para tal utilizados.

Assim, o projectista tem a responsabilidade de escolher o tipo de estrutura de acostagem mais vantajosa a todos os níveis, podendo ser um paramento vertical fechado ou aberto, sendo que o primeiro apresenta uma parede frontal e impermeável capaz de proteger o solo das ondas no tardoz da estrutura [26].

4.1 Paramento fechado

4.1.1 Estruturas gravíticas de acostagem

As estruturas gravíticas podem ser essencialmente de três géneros [41], nomeadamente, paredes de blocos, paredes de caixotões em betão e paredes de elementos celulares, a seguir descritos.

4.1.1.1 Paredes de blocos

Trata-se de uma opção construtiva das mais antigas, de elevada durabilidade devido aos materiais aplicados — betão ou rocha — e à consistência que confere, não necessitando grandes manutenções.

Constitui uma solução de execução relativamente simples, em particular quando o projectista define a aplicação de blocos de maiores dimensões [2], como os mostrados na Figura 4.1, conseguindo com isto cobrir a mesma área com menos blocos, economizando assim no tempo e nos custos de utilização do equipamento para assentá-los (gruas flutuantes, pontões, etc.), por exigir menos operações para a execução da tarefa.

Figura 4.1 – Parede de blocos.

As paredes de blocos são estruturas gravíticas capazes de vencer os impulsos horizontais, sendo fundamental que o solo em que serão assentados os blocos apresentem características capazes de suportar toda a estrutura, pois, caso contrário, será conveniente substituí-lo por um material mais capaz, modificar as suas propriedades por meio de compactação ou, ainda, criar colunas de rocha (Figura 4.2), dando com isto mais faculdades ao solo de resistir às cargas [2, 26].

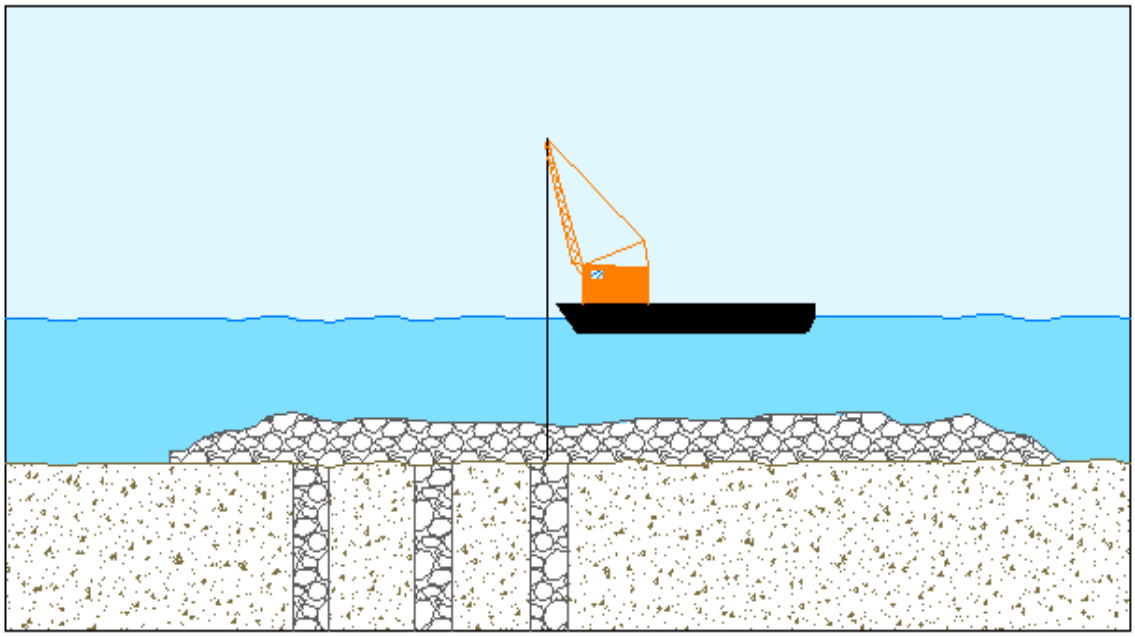

Figura 4.2 – Criação de colunas de rocha (adaptado de [41]).

Apesar das paredes de blocos serem estruturalmente viáveis, não são uma solução muito económica, tanto devido aos materiais aplicados, quanto pelo facto de ser muitas vezes necessário melhorar as propriedades do solo. Como alternativa a esta solução, tem vindo a ser comum a opção por paredes em betão armado, que podem chegar aos 20 metros de altura, desde que possuam contra-fortes [41].

4.1.1.2 Paredes de caixotões

Os caixotões são elementos pré-fabricados em betão armado, colocados através de gruas no local, os quais são enchidos com água para afundar, sendo a água posteriormente substituída por areia [2]. Uma parede de caixotões consegue-se colocando-os lateralmente de forma adjacente.

Tal como a no caso da muralha de blocos, é importante que o solo esteja aplanado e que apresente resistência suficiente, evitado, desta forma, que sucedam assentamentos ou deslocamentos que contribuam para que a parede deixe de ser impermeável, pelo rompimento das juntas entre os caixotões [26], permitindo eventuais fugas de material no tardoz destes.

4.1.1.3 Paredes de elementos celulares

Este tipo de parede compõe-se através da cravação ordenada de estacas-prancha — que podem chegar a medir 25 m — ligadas entre si, podendo estas serem de distintos materiais — plásticas, em madeira ou metálicas — formando pequenas células que se unem umas às outras, sendo tais células preenchidas por um material a designar pelo projectista, usualmente areia [41].

Trata-se de uma solução de execução relativamente rápida, não necessitando do auxílio de mergulhadores, sendo usualmente mais económica que as referidas anteriormente, em vista da possibilidade de diminuição do tamanho das estacas mais próximo da linha de costa.

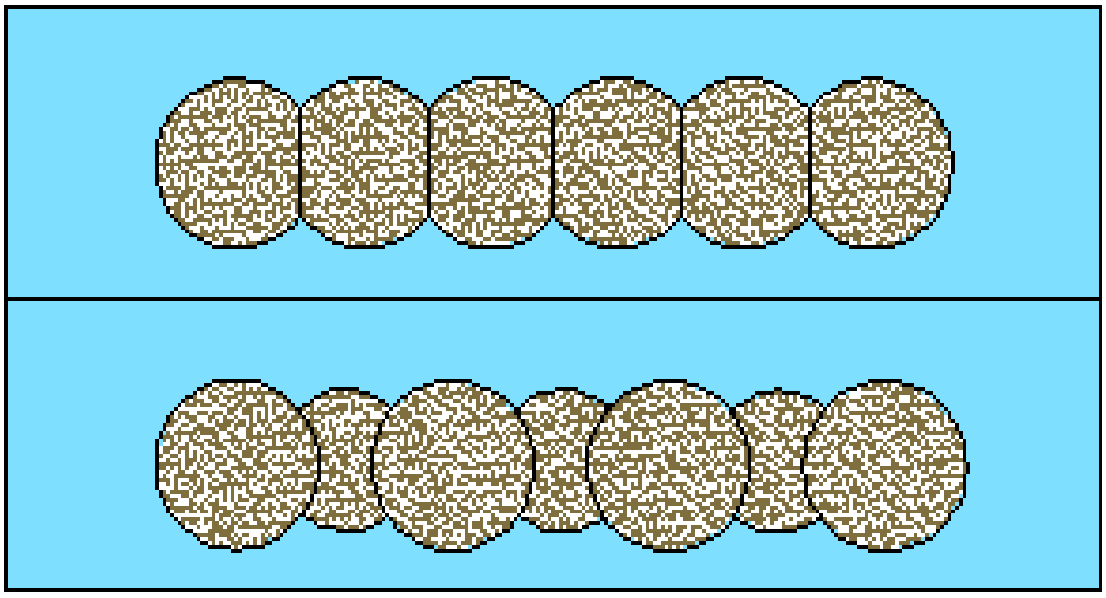

Figura 4.3 – Tipos de células de estacas-prancha mais comuns (adaptado de [41]).

O procedimento para a execução de uma muralha de elementos celulares, do tipo mostrado na Figura 4.3 b), por meio de molde interior, pode ser descrito, sucintamente, da seguinte forma [41, 55]:

— identificação do local de implementação da célula principal e colocação do molde;

— aprumo das estacas-prancha na posição pretendida e sua conexão, uma a uma;

— conseguida a forma da célula estipulada, esta é fechada, estando assim pronta para ser cravada, sendo pertinente referir que, devido ao peso próprio das estacas, estas podem já ter transposto o nível do solo e penetrado uma pequena percentagem;

— procede-se à cravação das estacas até encontrar solo firme, de forma progressiva, até completar a primeira célula;

— uma vez cravada a célula, é removido o molde;

— a célula é preenchida com o material estipulado;

— os passos anteriores são repetidos por duas vezes, obtendo-se um total de três células;

— entre as três células preenchidas, existem dois espaços livres, onde serão colocados os moldes em arco;

— as estacas-prancha são colocadas na posição pretendida e ligadas entre si, uma a uma;

— as estacas são cravadas;

— após a cravação, é retirado o molde e depositado o material de enchimento;

— este procedimento é repetido ao longo do comprimento da muralha a construir, sempre executando primeiro as células principais e, posteriormente, os arcos de ligação;

— execução de uma viga de coroamento no topo da muralha, reforçando a continuidade desta;

— completa-se com o material de enchimento até á altura da viga;

— finalmente, procede-se à pavimentação.

A Figura 4.4 mostra uma fase da execução de uma muralha celular, de acordo com o processo antes descrito.

Figura 4.4 – Exemplo de uma muralha celular (adaptado de [54]).

Durante a execução deste método, mais precisamente até ao período de enchimento, é importante que o molde seja suficientemente forte, capaz de manter a célula estática, evitando deformações desta, provocadas pela hidrodinâmica ou por acções do vento.

A cravação de estacas é um processo relevante para o sucesso da muralha, devendo ocorrer de maneira a que não existam variações de altura superiores a 70 cm entre estacas adjacentes [41].

Caso o solo seja heterogéneo, poderão aparecer zonas muito rígidas, constituídas por material rochoso, nas quais é difícil cravar as estacas, situação esta em que se torna necessário abrir uma vala que, posteriormente ao aprumo do perfil, será selada com betão.

4.1.2 Paredes de estacas-prancha

Tal como o nome indica, este método construtivo implica a utilização de estacas-prancha formando uma cortina. São estruturas leves, podendo ser subdivididas em dois tipos, estacas-prancha simples e estacas-prancha com plataforma de alívio [2].

4.1.2.1 Paredes de estacas-prancha simples

Paredes de estacas-prancha simples são estruturas pertinentemente tidas em conta quando se decide sobre o tipo de estrutura a implementar, por serem usualmente a solução mais económica para alturas compreendidas entre os 7 m e os 10 m [41].

No entanto, para solos muito duros, a cravação das estacas-prancha poderá ser um obstáculo, aumentando o tempo de execução e, simultaneamente, acarretando custos, com a abertura de valas e posterior fixação e preenchimento com um material como o betão.

Trata-se de um tipo de muralha que, por si só, pode não ser capaz de suportar impulsos provocados pelo solo, forças de atracação e carregamentos horizontais, sendo por isto auxiliadas por tirantes capazes de reduzir os momentos flectores da estrutura. Em caso de diferenças nos níveis de água nos lados da parede ou de variações repentinas de marés, a estrutura poderá estar sujeita a impulsos hidrostáticos, podendo estes serem minimizados com a incorporação de material de enrocamento [26].

Porém, em solos fracos, a usual ancoragem de apoio, por serem necessários tirantes muito compridos, pode ser substituída por estacas inclinadas (cavaletes).

Este tipo de estrutura apresenta alguma capacidade de flexão, o que pode significar problemas no caso de excesso de cargas não previstas [2].

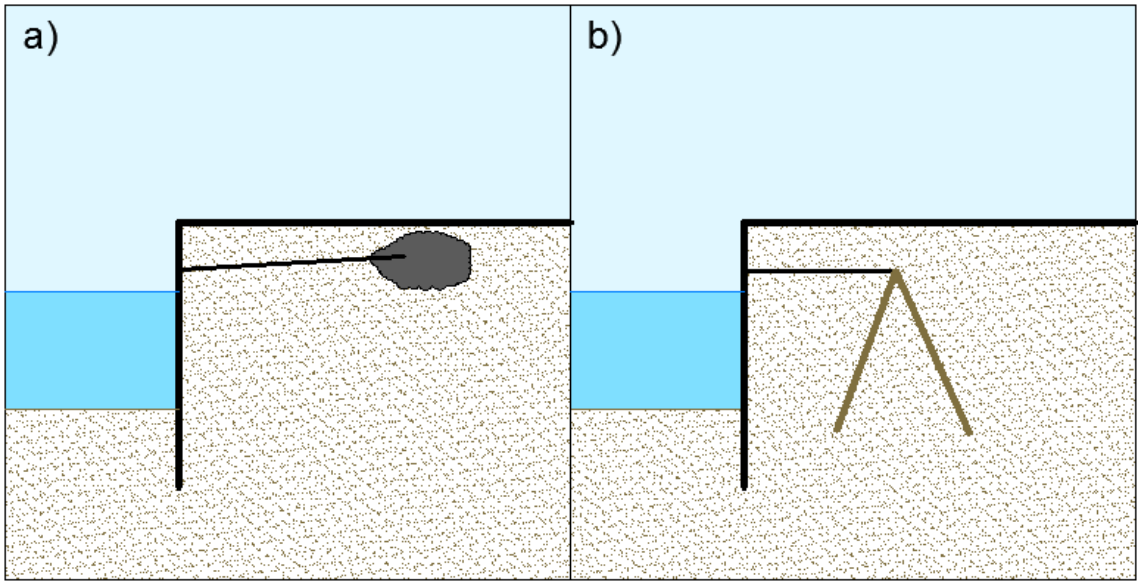

Figura 4.5 – Exemplo de paredes de estacas-prancha: a) ancorada; b) com cavalete (adaptado de [2]).

4.1.2.2 Paredes de estacas-prancha com plataforma de alívio

Este tipo de estrutura, também conhecida como cais dinamarquês (Figura 4.6), é usada especialmente quando os solos são pouco resistentes e estão previstos impulsos activos e grandes solicitações derivadas de carregamentos na plataforma, sendo que estas acções serão direccionadas para as estacas de amparo, podendo ou não existirem tirantes ancorados também capazes de suportar algumas destas cargas [2].

Paredes de estacas-prancha com plataforma de alívio são uma solução que deve ser proposta como alternativa às estacas-prancha simples sempre que a altura seja superior a 10 m [41], uma vez que estas últimas provavelmente se tornarão pouco viáveis a nível económico.

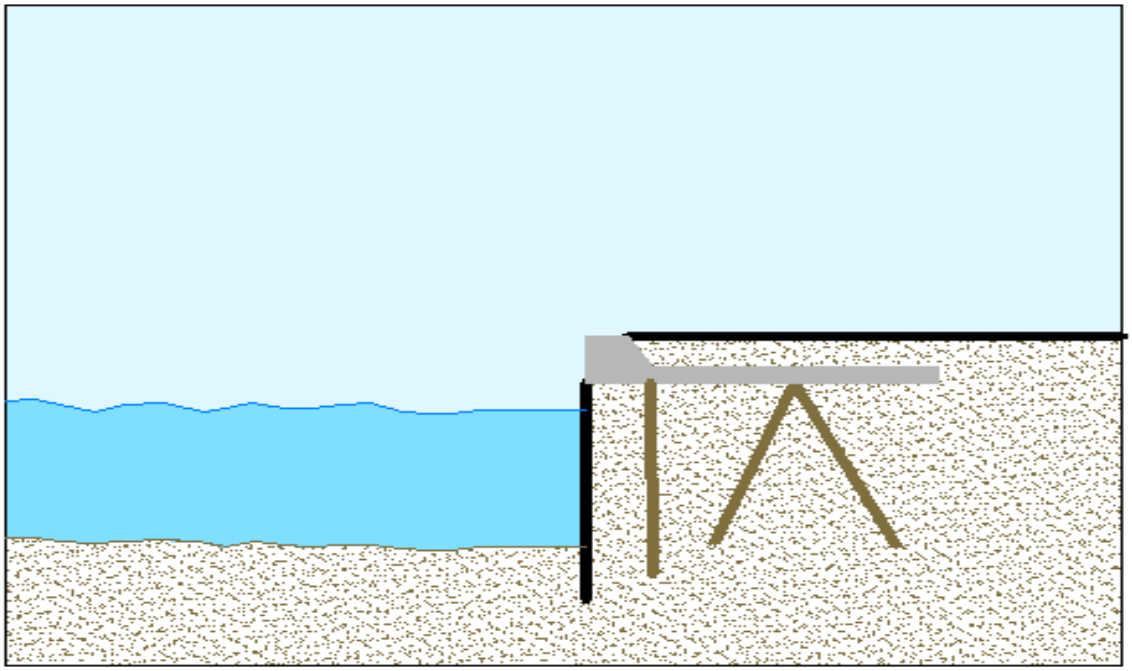

Figura 4.6 – Exemplo de parede de estacas-prancha com plataforma de alívio (adaptado de [2]).

A execução de uma parede de estacas-prancha com plataforma de alívio pode ser descrita da seguinte forma [41]:

— identificação do local e cravação das estacas, tanto inclinadas (cavaletes) quanto verticais;

— posicionamento e cravação das estacas-prancha;

— utilização de pregagens ou ancoragens, provisórias ou permanentes, ao solo ou às estacas inclinadas;

— deposição do material de enchimento a designar pelo projectista, usualmente areia, no tardoz da parede;

— implantação da plataforma de alívio, apoiada sobre as estacas;

— deposição do material a designar pelo projectista, de forma a acertar a altura pretendida;

— pavimentação;

— (opcional) dragagem junto ao pé da estrutura.

4.2 Paramento aberto

O paramento aberto, contrariamente a todos os tipos mencionados anteriormente, não apresenta uma parede frontal, tratando-se de uma estrutura leve, ostentando uma plataforma de alívio, além de ancoragens de apoio ou estacas inclinadas (Figura 4.7), que têm a função de transmitir ao solo as forças verticais, ao passo que as estacas verticais transmitem directamente as cargas nesta direcção [2].

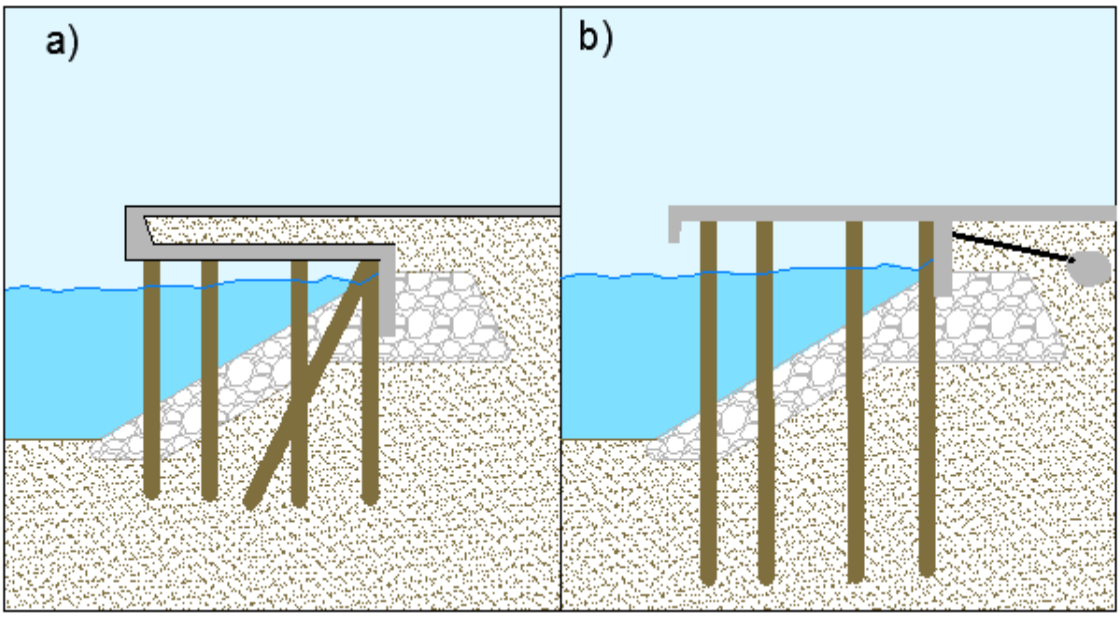

Figura 4.7 – Exemplo de estruturas de paramento aberto: a) com plataforma de alívio com estacas inclinadas; b) ancoragem de apoio (adaptado de [2]).

Tal como é perceptível e comum nos dois casos ilustrados acima, é imperativo que exista um talude, com início próximo do ponto mais afastado do cais, com a função de proteger a estrutura da dinâmica hidráulica, natural ou provocada pelos propulsores dos navios.

Este talude pode ser composto por solo ao qual é sobreposto uma camada de enrocamento ou, em alternativa, unicamente por enrocamento (rochas, blocos de betão, gabiões), não devendo o mesmo apresentar uma espessura inferior a 1 m – 1,5 m [41].

No ponto alto do talude, é necessária a colocação de uma parede, usualmente em estacas-prancha ou betão, capaz de suportar o impulso do solo e impedir a passagem de materiais finos.

4.3 Tipos de configuração dos molhes

De acordo com as condições locais, tendo em conta factores como a batimetria, o desenho da costa e a acção do mar, o projectista deve escolher a melhor configuração de posicionamento dos molhes, de modo a possibilitar a entrada, movimentação e atracação das embarcações em segurança.

4.3.1 Molhes paralelos à costa

Esta configuração (Figura 4.8) é utilizada quando a linha da costa apresenta-se côncava, possibilitando a construção de um único molhe — geralmente próximo e paralelo à costa ao longo do seu comprimento — capaz de criar uma zona de alguma calma para as embarcações, ao contrário dos restantes modelos, que implicam dois molhes, apresentando-se assim como uma solução mais económica [69].

4.3.2 Molhes convergentes entre si

A implantação de duas estruturas convergentes entre si (Figura 4.9) é a situação mais comum nos portos de acostagem de navios, sendo utilizados para conseguir zonas com profundidade suficiente para as maiores embarcações e também para impedir a entrada de correntes e ondas importunas para as embarcações [69].

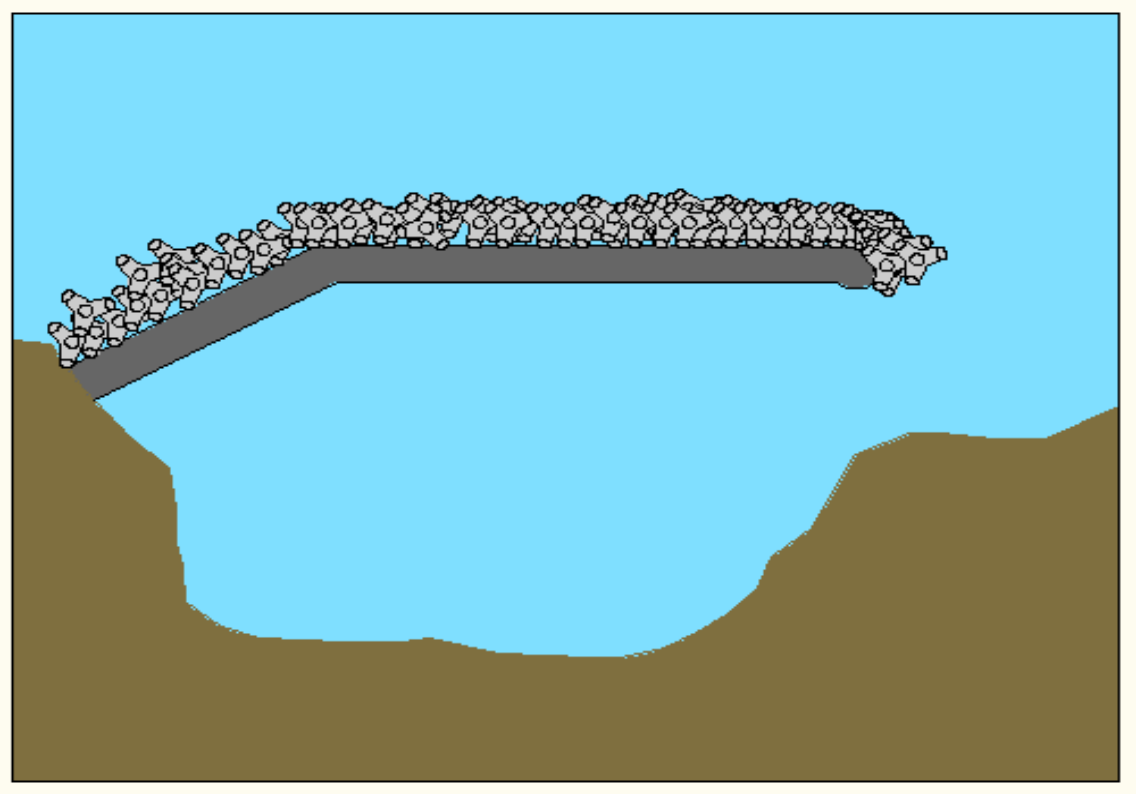

Figura 4.8 – Molhe paralelo à costa.

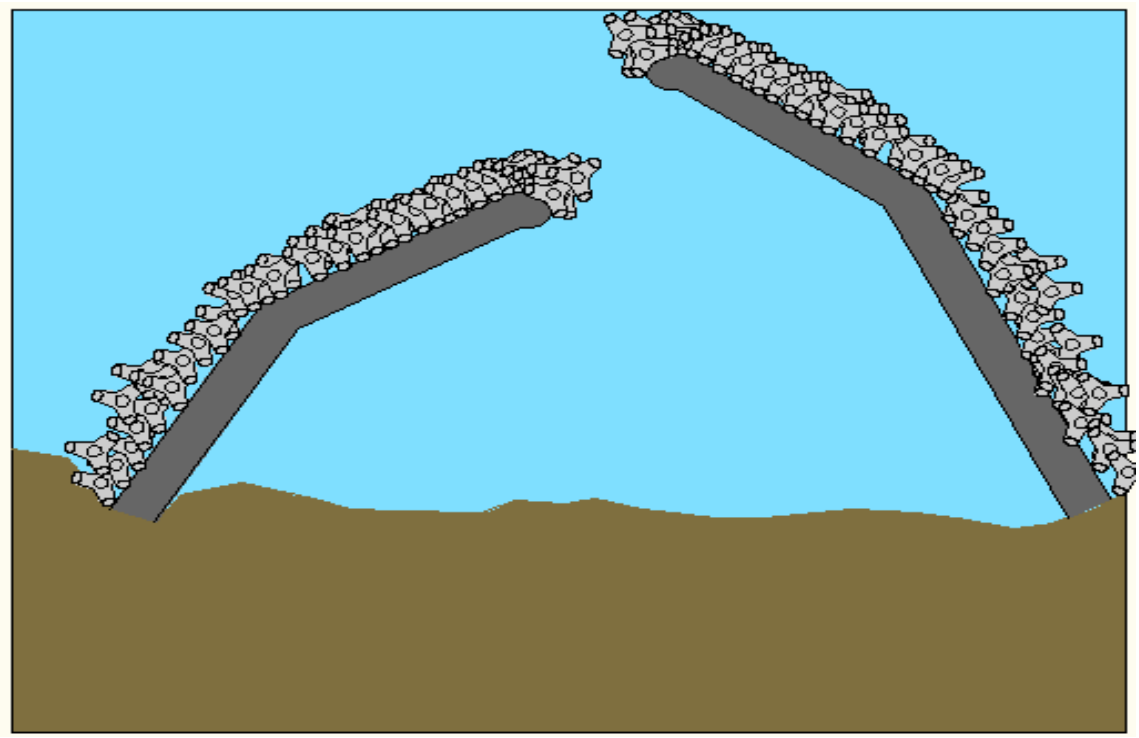

Figura 4.9 – Molhes convergentes.

4.3.3 Molhes paralelos entre si

São estruturas posicionadas de forma paralela entre si (Figura 4.10), utilizadas essencialmente nas embocaduras dos rios, ampliando-as, evitando assim a penetração da agitação marítima, tendo no entanto o inconveniente de poder causar assoreamento [69].

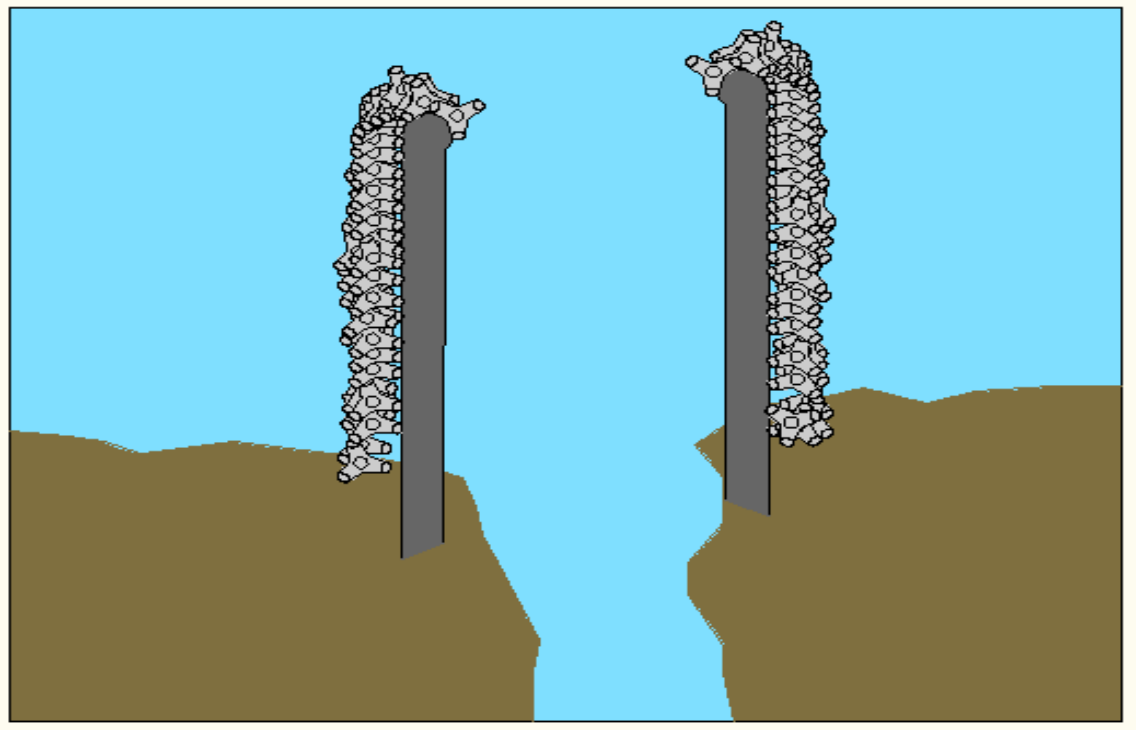

Figura 4.10 – Molhes paralelos entre si.

4.4 Acções das embarcações e sistemas de defensa

4.4.1 Atracação

A atracação das embarcações gera nas estruturas marítimas, no acto do impacto, energia cinética, que é transformada em energia potencial das estruturas e defensas [2], sendo portanto uma acção a considerar no projecto de cais.

A análise à estabilidade do cais perante a colisão de uma embarcação pode ser ponderada tendo em conta diversos parâmetros, desde logo a direcção e a

intensidade do impacto entre a embarcação e a estrutura, tendo em conta o ângulo de impacto e a velocidade e massa da embarcação, bem como a quantidade de energia cinética transmitida pela embarcação e absorvida pela estrutura ou pelos diferentes elementos de defensa [69].

4.4.2 Amarração

As embarcações, quando atracadas, transmitem forças à estrutura, denominadas forças de amarração, que são provocadas pelo vento nas partes emersas e pelas ondas e correntes nas partes imersas [2], sendo transmitidas aos elementos de fixação (Figura 4.11) pelos cabos de amarração.

Figura 4.11 – Elementos de fixação dos cabos de amarração.

Antes de uma embarcação atracar e ser amarrada, a mesma possui seis graus de liberdade, sendo três de rotação e outros três de translação:

a) Translação:
   — deslocamento, na direcção longitudinal do navio (eixo x);
   — abatimento, na direcção transversal (eixo y);
   — balouço, na direcção vertical (eixo z);

b) Rotação:
   — balanço (eixo x);
   — arfagem (eixo y);
   — cabeceio (eixo z).

Um sistema de amarração tem por objectivo limitar a movimentação da embarcação, essencialmente por meio do condicionamento do deslocamento (eixo x), do abatimento (eixo y) e do cabeceio (eixo z).

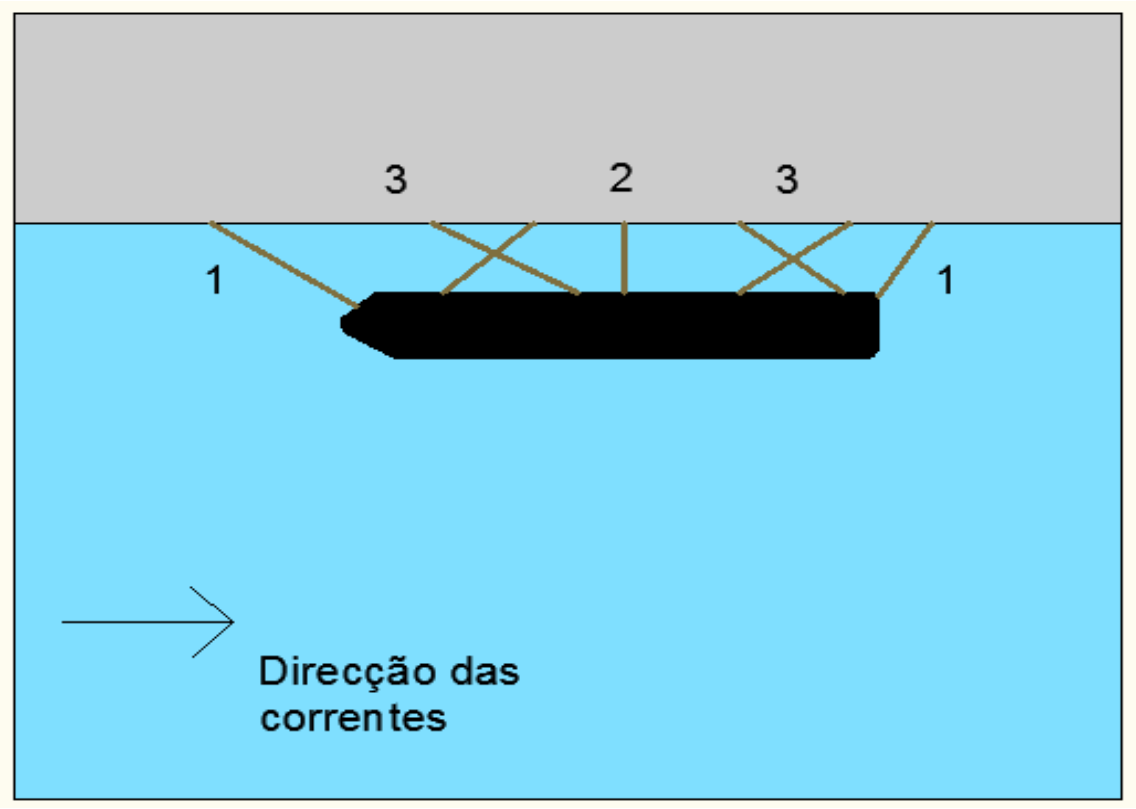

Figura 4.12 – Exemplo de sistema de amarração (adaptado de [71]).

Os cabos de amarração têm funções distintas (Figura 4.12), sendo os "lançantes" (1) capazes de evitar o cabeceio e resistir aos deslocamentos provocados por correntes marítimas e por ventos soprando na mesma direcção, servindo os "transversais" (2) para contrariar os esforços também provenientes de correntes e ventos, porém transversais, e as "linhas" (3) como complemento dos cabos anteriores [71].

4.4.3 Defensas

Nos projectos de obras de acostagem, é primordial antever as acções derivadas das embarcações sobre as estruturas, quer através das forças de amarração, quer por meio das forças de atracação, sendo, no entanto, economicamente inviável projectar uma estrutura para suportar uma colisão violenta sem que esta provoque danos. Para tal, existem diversos sistemas de defensas, capazes de absorver a energia cinética dos impactos das embarcações, evitando estragos quer nas estruturas, quer nas próprias embarcações.

Existem diferentes tipos de defensas, em vários modelos (Figura 4.13), sendo as mais usuais as elásticas, as de gravidade e as flutuantes. As defensas são constituídas por diversos materiais (madeira, aço, borracha), sendo a borracha o mais utilizado, pelas suas características de material elástico, capaz de absorver as cargas, deformar-se e, posteriormente, voltar à posição inicial sem perder capacidades, mesmo em contacto com a água salgada, evidenciando ainda uma maior durabilidade do que outros materiais [69].

Figura 4.13 – Vários tipos de elementos de defensa: a) cilíndrica radial; b) arco; c) axial; d) cone; e) pneumática; f) rodas (extraído de [70]).

Assim sendo, alguns dos requisitos para a selecção do tipo de defensas são:

— prevenir, quanto possível, o contacto directo da embarcação com a estrutura;

— assegurar a absorção da energia transmitida durante o contacto entre o navio e a estrutura, de forma que não lhe seja transmitida energia além do limite;

— garantir que o sistema de defensas resista aos esforços actuantes, nomeadamente aos tangenciais;

— seleccionar correctamente os elementos, tendo em conta as pressões indicadas pelo fabricante, de forma a que não sucedam danos aos cascos dos navios [71].

4.4.3.1 Defensas de gravidade

As defensas de gravidade são um tipo de defensa não muito utilizado devido às suas limitações, uma vez que, quando solicitadas por grandes energias, decorrentes de movimentos amplos de embarcações com grande massa, muitas vezes não conseguem absorvê-las, devido a limitações construtivas [71].

Este tipo de defensa foi idealizado para, através de um elemento móvel, converter o impacto causado pelas embarcações em serviço numa elevação do centro de gravidade de uma massa associada à defensa.

4.4.3.2 Defensas elásticas

Tal como o nome indica, é um sistema que actua através do princípio da deformação elástica, sendo idealizado para se deformar o mínimo possível e transmitir à estrutura e à embarcação toda a energia provocada pelo impacto [71]. Para conseguir tal comportamento, o material utilizado neste tipo de defensas é a borracha, submetida a tratamentos visando garantindo sua durabilidade perante as acções físicas ambientais e aos impactos [2].

4.4.3.3 Defensas flutuantes

Distintas das anteriores, mas não menos utilizadas, são as defensas flutuantes, nomeadamente as pneumáticas e hidropneumáticas. Este tipo de defensas são muito utilizadas, uma vez que apresentam baixa rigidez e, portanto, são capazes se deformar ao receber grandes solicitações, absorvendo muita energia e, assim, não transmitindo muita pressão à estrutura.

As defensas flutuantes são elementos constituídos por borracha e tecido nylon reforçado, revestidos por pneus, enchidos essencialmente por ar comprimido ou um misto de ar a água, que são repelidos a uma determinada pressão interna por uma válvula de segurança [72].

5 TIPOS DE BLOCOS DE BETÃO UTILIZADOS EM OBRAS MARÍTIMAS

Com a dificuldade de extrair rochas em grandes quantidades e com elevados pesos, capazes de resistir aos impactos das ondas sem se deslocarem, e tentando encontrar soluções aos anti-económicos paralelepípedos de betão, surgem em 1950 os blocos do tipo tetrápode. Construídos igualmente em betão, apresentam quatro "patas" espacialmente espaçadas em 120°, situando-se o centro de gravidade na sua junção, servindo tais "patas" de apoio aos blocos adjacentes, evitando que estes rolem ou balancem. O emprego deste tipo de bloco revolucionou os projectos de obras marítimas, ao permitir, na formação de um manto com duas camadas de blocos, a obtenção de aproximadamente 50% de vazios, conseguindo desta forma uma significativa redução de material, comparativamente com os blocos na forma de paralelepípedos, além de apresentar uma boa capacidade de dissipação da energia das ondas [68].

Os blocos de betão são elementos aplicados com o objectivo de dissipar a energia das ondas, combatendo a erosão e prevenindo contra inundações e todas as consequências que destas advêm, sendo empregues, tanto posicionados de forma metódica quanto aleatória, em diferentes estruturas marítimas.

São geralmente fabricados unicamente em betão, o que os torna frágeis quando sujeitos a forças de tracção comparativamente com forças de compressão, com excepção dos blocos multi-furos, que são geralmente reforçados com aço, por apresentarem secções relativamente pequenas e mais facilmente quebráveis.

O projectista tem ao seu dispor diversos modelos de blocos de betão, de vários tamanhos, que foram desenvolvidos ao longo dos anos, cabendo-lhe escolher as configurações destes que melhor se adequam à obra em questão, devendo antes ponderar as vantagens e desvantagens da aplicação dos blocos de betão ou de blocos de pedra, caso estes existam nas proximidades da localização da obra.

Em Portugal, os modelos de blocos de betão mais utilizados são os tetrápodes e os blocos Antifer.

Outrora, os blocos de betão formavam camadas armadas, pouco eficazes devido à baixa rugosidade e reduzida porosidade das mesmas, apresentando tensões elevadas, pouca estabilidade estrutural, dificuldade acrescida para colocação dos blocos de forma organizada, sobretudo debaixo de água, além de exigirem o emprego excessivo de betão, o que encarecia exponencialmente a obra.

Porém, têm vindo a surgir novos modelos de blocos de betão, desenvolvidos com o objectivo de proporcionar soluções mais adequadas e economicamente mais aceitáveis, podendo estes ser agrupados em quadro famílias [60]: *blocos maciços* (por exemplo, cubos, paralelepípedos e Antifer*), blocos volumosos* (por exemplo, Core Loc® [24], Accropod®, Xbloc® e Haro®)*, blocos delgados* (por exemplo, tetrápodes e dolos) e *blocos multi-furos* (por exemplo, blocos celulares tipo Shed e Cob), ilustrados na Figura 5.1.

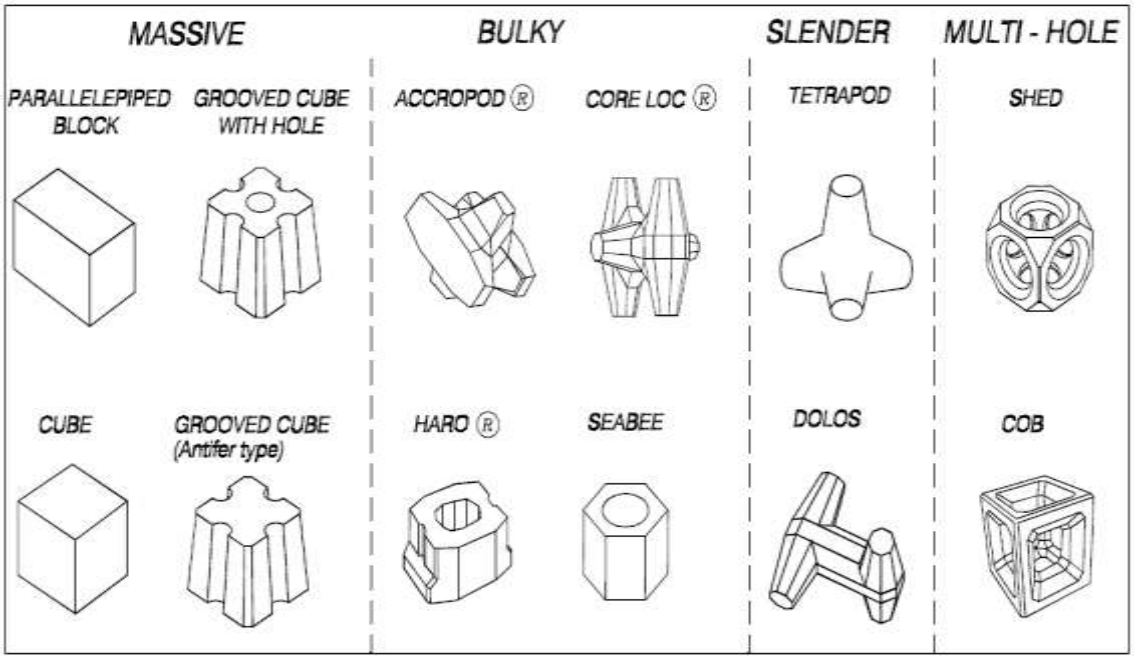

Figura 5.1 – Tipos de blocos de betão mais comuns (extraído de [60]).

Na procura da solução mais acertada, existem diversos factores a ter em conta. Desde logo, no fabrico, é imperativo que o betão seja o mais indicado para a situação, sendo a característica primordial dos blocos o seu peso.

Na colocação dos blocos, existem meios topográficos de elevada precisão, tipo GPS, que auxiliam no seu correcto posicionamento de acordo com o especificado no projecto, mesmo em águas com pouca visibilidade. O seu rigoroso posicionamento visa garantir uma elevada estabilidade hidráulica em qualquer ângulo e, ao mesmo tempo, proporcionar a existência de uma eficiente relação de porosidade e rugosidade do talude, conseguindo assim dissipar eficazmente a energia das ondas. Conseguir o máximo de eficácia com o mínimo de blocos garante obter menos tensões internas, o que pode ser importante para que os blocos não se desloquem e seja necessária a sua recolocação, o que acarretaria mais custos.

Os blocos devem ser colocados de forma que, em caso de quebra de algum deles, a estabilidade não seja posta em causa e a sua substituição não seja muito complexa, sendo comum numerar os blocos para uma melhor percepção da posição no caso destes se movimentarem. Ao acontecer a fractura de um bloco, haverá uma alteração do seu centro de massa, que, por sua vez, pode levar à sua desestabilização, tornando-o mais vulnerável à acção das ondas, sendo assim fundamental assegurar a integridade dos blocos para garantir estabilidade estrutural e consequente protecção.

Em relação à disposição dos blocos sobre os taludes, é comum serem colocados em camadas com uma espessura correspondente a duas unidades, excepto alguns modelos volumosos, como os blocos Core Loc e Accropod, que, devido às suas características, podem permitir a formação de um manto de protecção de espessura significativa com apenas uma camada de blocos. Os blocos multi-furos, apesar de também poderem constituir uma só camada, são usualmente posicionados de forma mais metódica, como mostrado na Figura 5.2, o mesmo acontecendo geralmente com os blocos do tipo Antifer.

Figura 5.2 – Blocos celulares tipo Cob (extraído de [29]).

Os blocos maciços são elementos criados com grandes volumes de betão, possuindo grandes secções, o que os torna significativamente pesados. Quando fabricados com betão de qualidade capaz de resistir a algumas forças de tracção — geralmente ligeiras devido à grande área transversal — e com uma cura perfeita, sem grandes variações de temperatura que originem tensões e consequentes fissuras, está garantida a durabilidade e a não ruptura dos elementos, desde que não sejam submetidos a deslocamentos significativos. Devido às debilidades dos blocos delgados, os blocos do tipo maciço são dos mais aplicados, sobretudo o modelo Antifer, mostrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Blocos de betão tipo Antifer.

Os blocos multi-furos, por apresentarem pequenas secções, podem apresentar uma menor durabilidade quando comparados com demais, sobretudo se forem constantemente submetidos à acção das ondas, por fadiga do material ou, no caso de costas arenosas, por efeito da abrasão. Estes blocos devem ser colocados de forma meticulosa, a fim de não serem submetidos a impactos muito fortes e a evitar a colisão de uns com os outros. Apesar de serem colocados de forma adjacente, o vazio interno que apresentam é normalmente capaz de dissipar a energia das ondas incidentes.

Os blocos delgados, pelas suas dimensões transversais e pela ausência de armadura, quando submetidos a grandes tensões, são passíveis de rachaduras e fracturas. São posicionados de forma a que se engrenem e permaneçam estáveis, mesmo nas condições ambientais mais adversas, como mostrado na Figura 5.4. Se, por um lado, os espaços vazios existentes entre este tipo de blocos são uma mais-valia para dissipar a energia das ondas, deixá-los demasiado afastados pode levar a que se quebrem, pondo em causa a função a que se destinam.

Figura 5.4 – Blocos de betão tipo tetrápode.

Para a protecção de zonas costeiras em situações mais críticas, os blocos volumosos, geralmente muito pesados, constituem uma boa alternativa aos blocos delgados, tendo sido desenvolvidos diversos modelos [60], como os blocos Core Loc, Haro, Accropod e Xbloc, este último mostrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Bloco de betão do tipo Xbloc (extraído de [27]).

6 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA OBRA DE RECUPERAÇÃO DO PORTO DE ABRIGO DO PORTO SANTO

6.1 Enquadramento da área em estudo

6.1.1 Enquadramento geográfico

A Ilha do Porto Santo, localizada a NE da Ilha da Madeira e distanciando-se desta aproximadamente 44 km, possui uma área de 40,705 km^2 e um perímetro de 48,3 km [85], sendo portanto a segunda maior ilha pertencente ao Arquipélago da Madeira, umas das áreas insulares que integram a região biogeográfica da Macaronésia [86], representada na Figura 6.1.

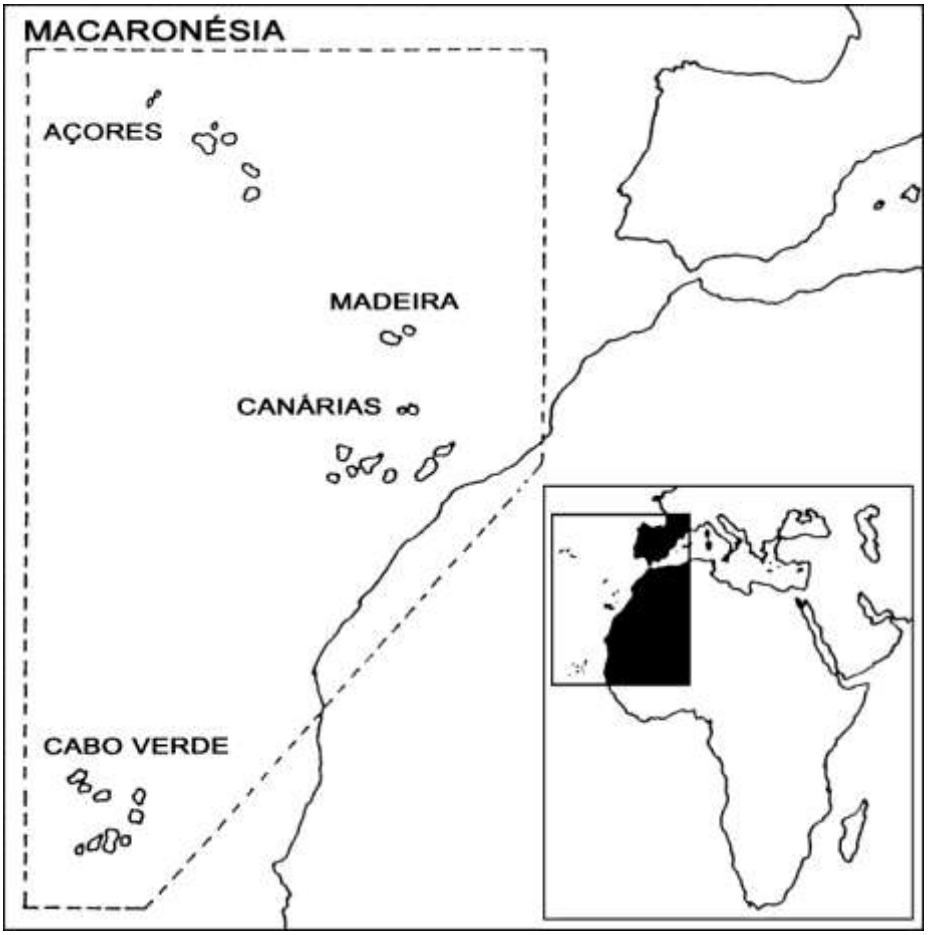

Figura 6.1 – Área geográfica da Macaronésia (adaptada de [86]).

O Porto Santo, com aproximadamente 11 km de comprimento por 5 km de largura máxima, apresenta uma praia arenosa com uma extensão de cerca de 9 km, localizada na costa sueste da ilha [57, 87], estando situado na sua zona nascente o porto de abrigo objecto deste estudo.

6.1.2 Enquadramento climático

A Ilha do Porto Santo está situada numa zona subtropical, com altas pressões provenientes do Atlântico Norte, as quais a submetem a ventos alísios de NE durante quase todo o ano.

Sendo o vento uma condicionante da dinâmica marítima, importa salientar que, neste caso específico, os ventos preponderantes são de rumo norte, verificando-se a maior intensidade para os ventos do quadrante oeste, como é possível observar na Tabela 6.1, onde estão indicados os oito rumos principais e de calma. Para dados recolhidos entre 1961 e 1990, indicados na Tabela 6.2, pode-se constatar que é no mês de Janeiro que se verifica a maior intensidade do vento [57], sendo de 16 km/h o valor médio máximo registado no referido período.

Para além da localização, existem outros factores que também condicionam o clima do Porto Santo, nomeadamente o relevo, a altitude, a reduzida dimensão da ilha e sua exposição [57].

Tabela 6.1 – Vento no Porto Santo no período de 1961 a 1990 de acordo com o rumo (extraído de [57]).

Rumo	Frequência (%)	Velocidade média (km/h)
N	**37,0**	19,3
NE	15,6	17,1
E	9,4	16,1
SE	4,8	14,9
S	6,0	19,2
SO	2,1	19,2
O	8,2	**20,0**
NO	11,7	19,8
C	5,3	–

Tabela 6.2 – Vento no Porto Santo no período de 1961 a 1990 de acordo com o mês (extraído de [57]).

Mês	Velocidade média (km/h)
Janeiro	**16,00**
Fevereiro	15,80
Março	15,70
Abril	15,20
Maio	15,00
Junho	14,90
Julho	15,20
Agosto	14,50
Setembro	12,40
Outubro	14,20
Novembro	15,20
Dezembro	12,50

6.2 Estudos realizados para a preparação da obra de recuperação do porto de abrigo

6.2.1 Batimetria e natureza dos fundos

Foram realizadas as indispensáveis medições da profundidade e do relevo do fundo do mar que banha a costa sueste da ilha do Porto Santo, verificando-se declives pouco acentuados até à cota -50 m (ZH), como se pode observar na Figura 6.2.

Os fundos ostentam grãos de areia que variam de granulometrias médias a finas, ao longo dos cerca de 9 km de extensão da praia, que culmina com o porto de abrigo no limite nascente desta [56].

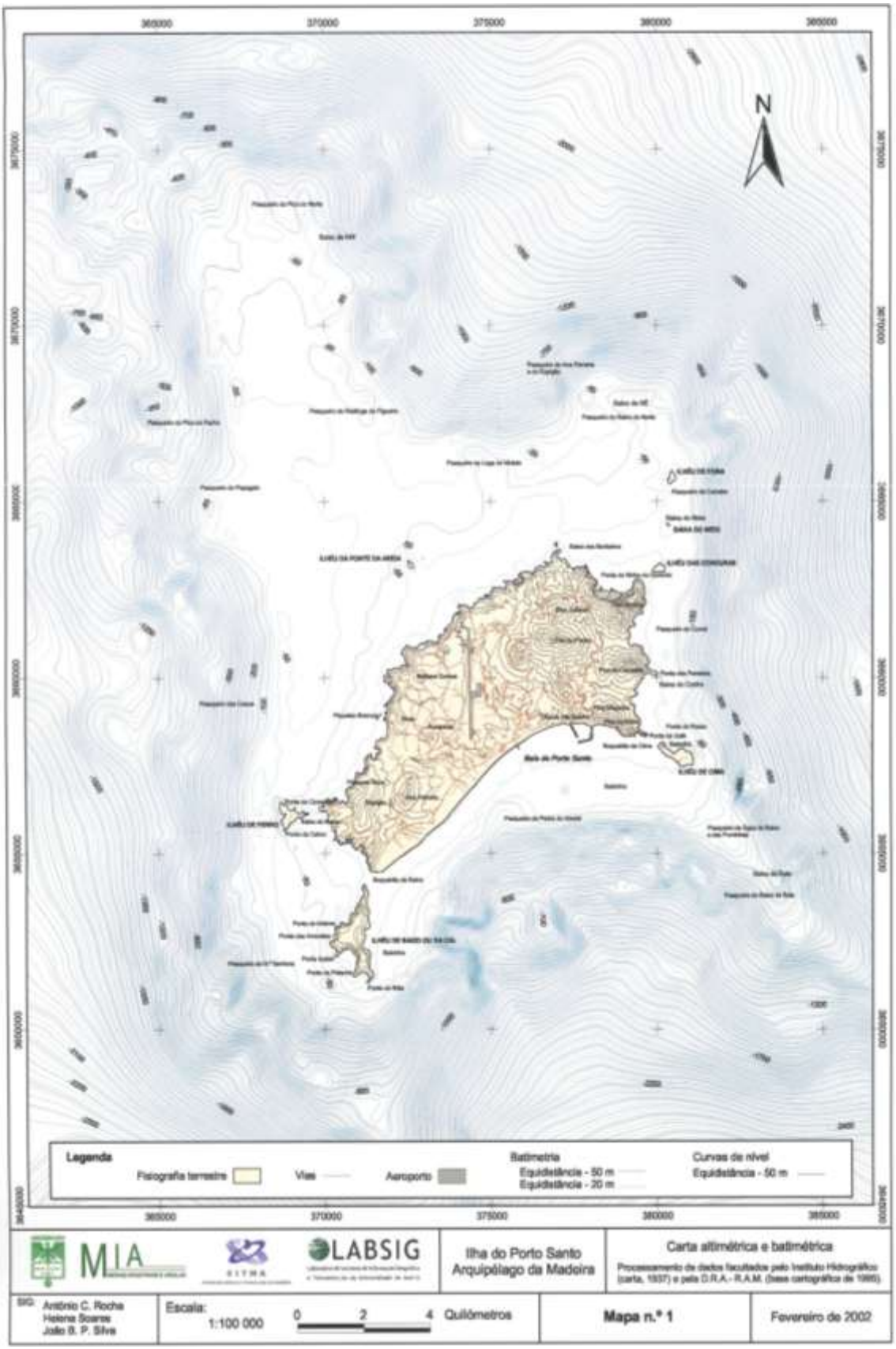

Figura 6.2 – Carta altimétrica e batimétrica do Porto Santo (extraído de [57]).

6.2.2 Elementos hidrográficos e outras inspecções

Para além da consulta do Plano e Pormenor do Porto da Carta nº 36401, Ilha do Porto Santo, do Instituto Hidrográfico, foram realizados levantamentos detalhados no ano de 2005, nomeadamente [56]:

— Levantamento hidrográfico no exterior do molhe, ao longo de uma banda com largura de cerca de 50 m;

— Levantamento do manto do molhe com sonar de varrimento lateral;

— Inspecção, com registo vídeo, efectuada por equipa de mergulhadores, à parte imersa do molhe e do manto (ver Figura 6.3);

— Inspecção visual do molhe principal do porto, com registo fotográfico da parte emersa.

— Levantamento topográfico da superstrutura e da parte emersa do manto resistente.

Figura 6.3 – Inspecção à parte imersa do molhe do Porto Santo (extraído de [56]).

6.2.3 Regime de marés e correntes

Os dados sobre os regimes de marés e de correntes na região da Ilha do Porto Santo até então não existiam, tendo sido utilizados dados respeitantes ao Porto do Funchal, extraídos da Tabela de Marés de 2005, editada pelo Instituto Hidrográfico. No entanto, tendo em consideração dados registados no ano de 1994, por observações maregráficas, a relação de amplitudes verificada entre os dois portos é da ordem de 1,06, sendo ainda indicado que as cotas deviam sofrer aumentos de 0,1 m em decorrência da variação do nível do mar. No arquipélago da Madeira, as marés são do tipo semi-diurno regular, acontecendo de forma quase simultânea em todo o arquipélago.

Os seguintes valores foram utilizados:
— Nível médio: +1,4 m (ZH)
— Baixa-mar mínima: +0,2 m (ZH)
— Preia-mar máxima: +2,8 m (ZH).

Contudo, em caso de ocorrência de depressões atmosféricas, não pode ser descurada a sobreelevação meteorológica do nível do mar.

No dimensionamento da obra de protecção, as correntes oceânicas e as correntes de maré foram tidas como insignificantes na baía do porto do Porto Santo [56].

6.2.4 Agitação marítima

Os dados referentes à agitação marítima no Porto Santo também não existiam, mas, através de modelação matemática, foram determinados valores próximos, tendo em conta um modelo espectral de propagação de ondas de superfície geradas pelo vento. As condições de agitação marítima foram então determinadas sobre a batimétrica −10 m (ZH) e ao longo de um segmento de recta situada à frente da obra a reparar. Também foram levados em conta alguns valores de agitação marítima recolhidos, desde 1989, ao largo da costa sul da Ilha da Madeira, pela bóia-ondógrafo do Funchal.

Importante frisar que foi utilizado o módulo NSW (Nearshore Spectral Wind-Wave Module) do modelo MIKE 21, que simula o crescimento, propagação e decaimento de ondas de curto período em zonas costeiras e águas rasas, tendo diversos parâmetros em ponderação, incluindo o vento, o atrito no fundo e a rebentação das ondas, responsáveis pela dissipação da sua energia, bem como o efeito da refracção e do empolamento provocados pela variação de profundidade.

Os resultados das experiências computacionais com o modelo numérico antes referido são ilustrados para três períodos distintos (8 s, 12 s e 16 s), como mostrado na Figura 6.4, sendo indicadas as distribuições das alturas e direcções das ondas em função dos rumos e dos níveis de maré [56, 67].

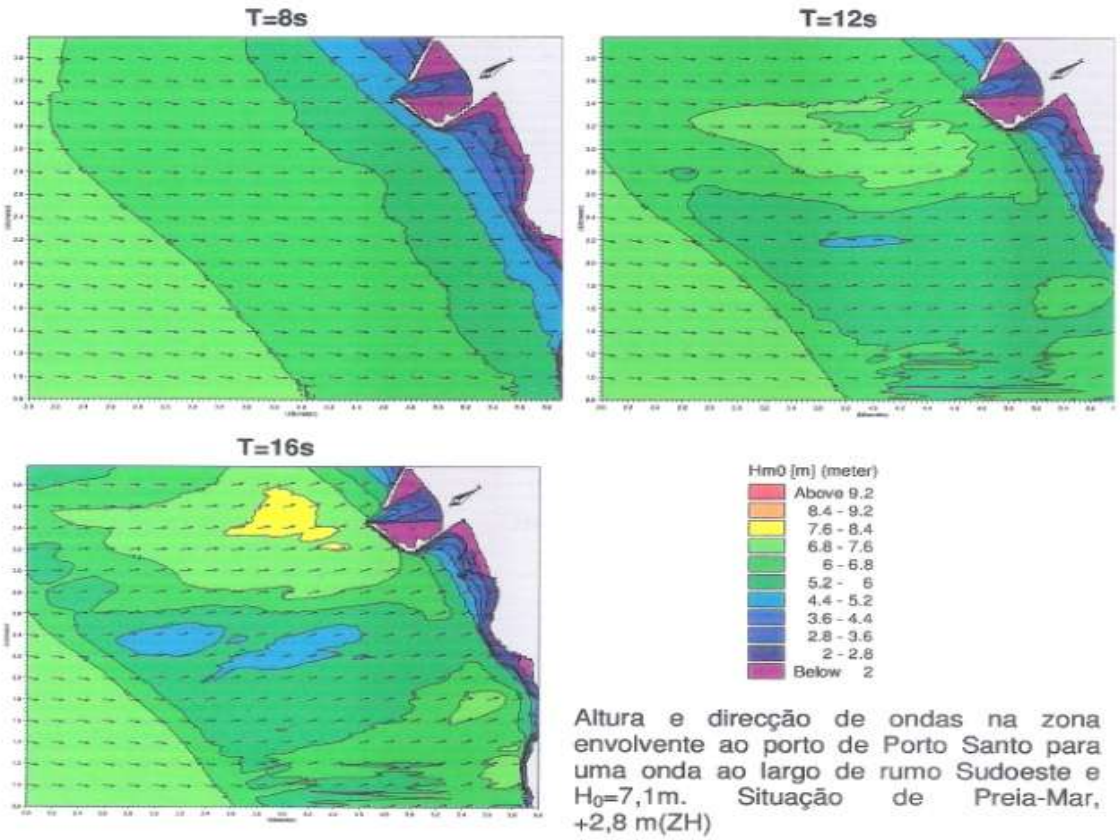

Figura 6.4 – Exemplo de propagação da agitação marítima próximo ao molhe principal do Porto Santo (extraído de [56]).

6.2.5 Estudo da estabilidade do manto

Os valores extremos da altura significativa das ondas verificados na costa sul da Ilha da Madeira, medidos pela bóia-ondógrafo do Funchal, serviram de ponto de partida para o estudo da estabilidade do manto resistente do molhe.

Para um período de retorno de 50 anos, foram adoptados os valores máximos de altura significativa de 7,1 m e 6,8 m, ao largo, respectivamente para os rumos 225° (SW) e 180° (S), conforme mostrado na Tabela 6.3, sendo destes valores extraídas as alturas significativas de onda no alinhamento do molhe principal do Porto do Porto Santo apresentadas na Figura 6.5. O dimensionamento do manto resistente foi assim efectuado tendo por base uma altura significativa máxima das ondas de 7,4 m na cota −10 m (ZH).

Tabela 6.3 – Valores extremos de ondas, em metros, na costa sul da Madeira (extraído de [57]).

Período de retorno	Rumo				
	W	SW	S	SE	E
1 Ano	3,70	3,50	2,60	2,00	1,00
5 Anos	4,60	4,70	4,00	2,60	1,20
10 Anos	5,30	5,40	4,80	3,00	1,30
25 Anos	6,10	6,40	5,90	3,40	1,40
50 Anos	6,70	**7,10**	**6,80**	3,80	1,50
100 Anos	7,30	7,80	7,60	4,10	1,60

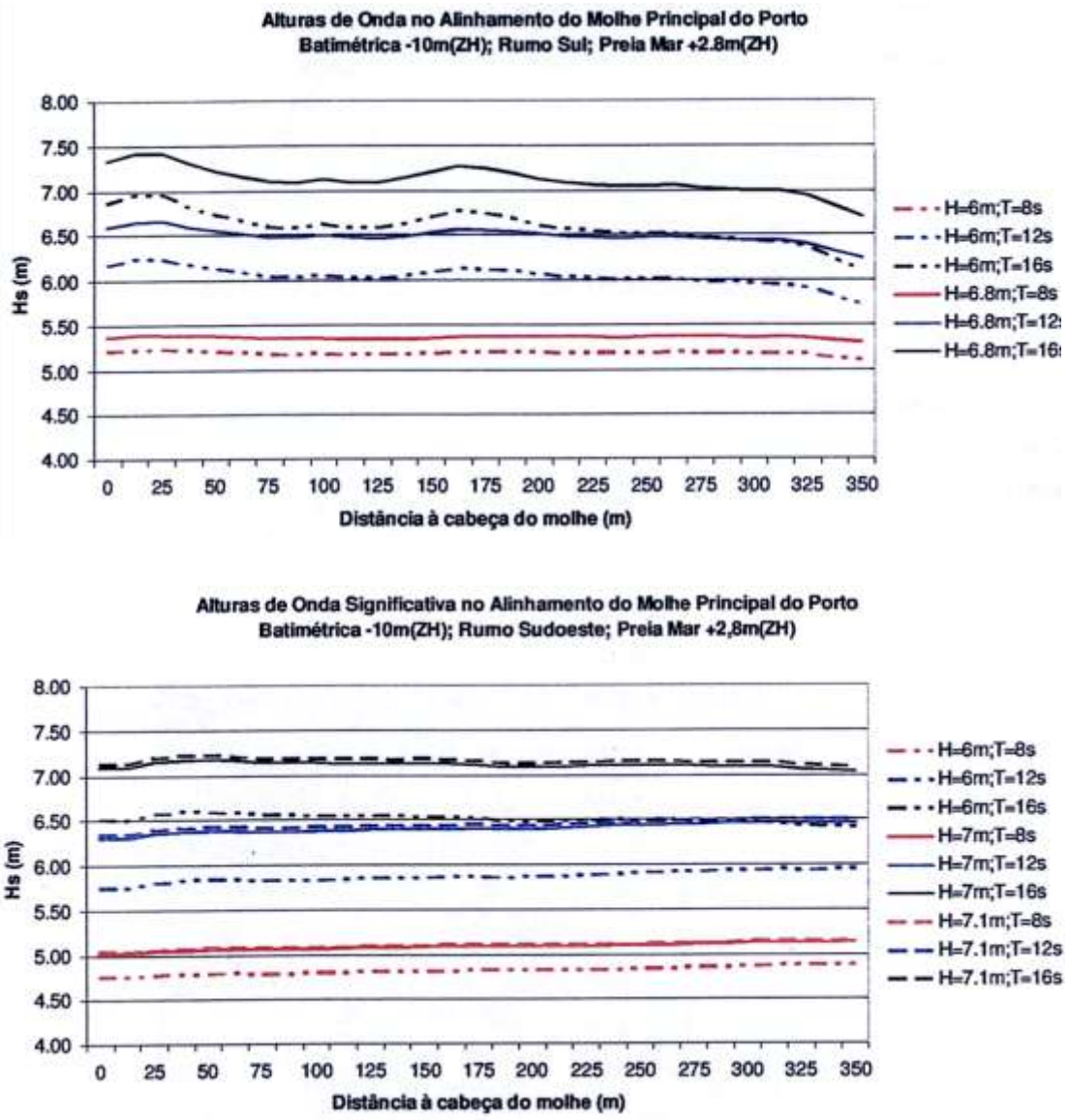

Figura 6.5 – Altura significativa das ondas no alinhamento do molhe principal (extraído de [56]).

6.3 Caracterização da obra existente

O porto de abrigo da Ilha do Porto Santo é uma estrutura marítima construída no final da década de 1980, que foi posteriormente ampliada de modo a atender as necessidades decorrentes do desenvolvimento da Região. Actualmente, é constituído por um molhe principal de atracação de navios e um contra-molhe, também com capacidade para atracação de embarcações, de menores dimensões, formando, portanto, uma estrutura de protecção marítima do tipo convergente.

A bacia do porto tem como base fundos de características arenosas [57, 87], oscilando sua profundidade entre −1 m (ZH) e −10 m (ZH) numa área com cerca de 233 mil metros quadrados. Esta profundidade máxima (−10 m) está situada à cabeça do molhe.

O molhe principal tem cerca de 900 m de comprimento, distribuídos em dois troços rectos, existindo entre estes uma concordância em curva. Ao primeiro troço do molhe, perpendicular à costa e orientado N-S, segue-se o segundo, com orientação N80°E.

O molhe principal do Porto Santo (N80°E) foi concebido para a atracação de navios, sendo o cais construído para o efeito uma estrutura gravítica de acostagem de paramento fechado formada por blocos de betão. As defensas para atenuar os impactos das embarcações sobre a estrutura são constituídas por elementos pneumáticos, como mostrado na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Defensas pneumáticas.

O contra-molhe do porto de abrigo do Porto Santo, com uma extensão de 300 m, mostrado à direita na Figura 6.7, é igualmente caracterizado pelo paramento fechado, sendo o troço mais largo constituído por blocos de betão assentes sobre

um prisma de enrocamento protegido externamente por tetrápodes. Mais junto à costa, onde está implantada uma marina de recreio, a parte interior do conta-molhe é internamente constituída por um enroncamento.

No molhe principal, a largura da superstrutura é de aproximadamente 18 m, dispondo a mesma, na parte exterior, de um muro deflector, seguido de um manto protector de blocos em betão, tipo tetrápode, com pesos de 10 e 16 ton., conforme indicado na Figura 6.8.

Em relação ao outro troço (N-S) do molhe do Porto Santo, uma vez que não se trata de um cais de atracação de navios, diferencia-se na sua parte interior, que, em lugar da muralha de blocos de betão, apresenta um talude, formando um declive com a relação 3:2, com um enrocamento de rochas com pesos variantes entre 5 kN e 20 kN, seguindo de um filtro seleccionado de rochas com pesos superiores a 0,2 kN e de um núcleo constituído por TOT.

Figura 6.7 – Vista geral do porto de abrigo do Porto Santo (extraído de [88]).

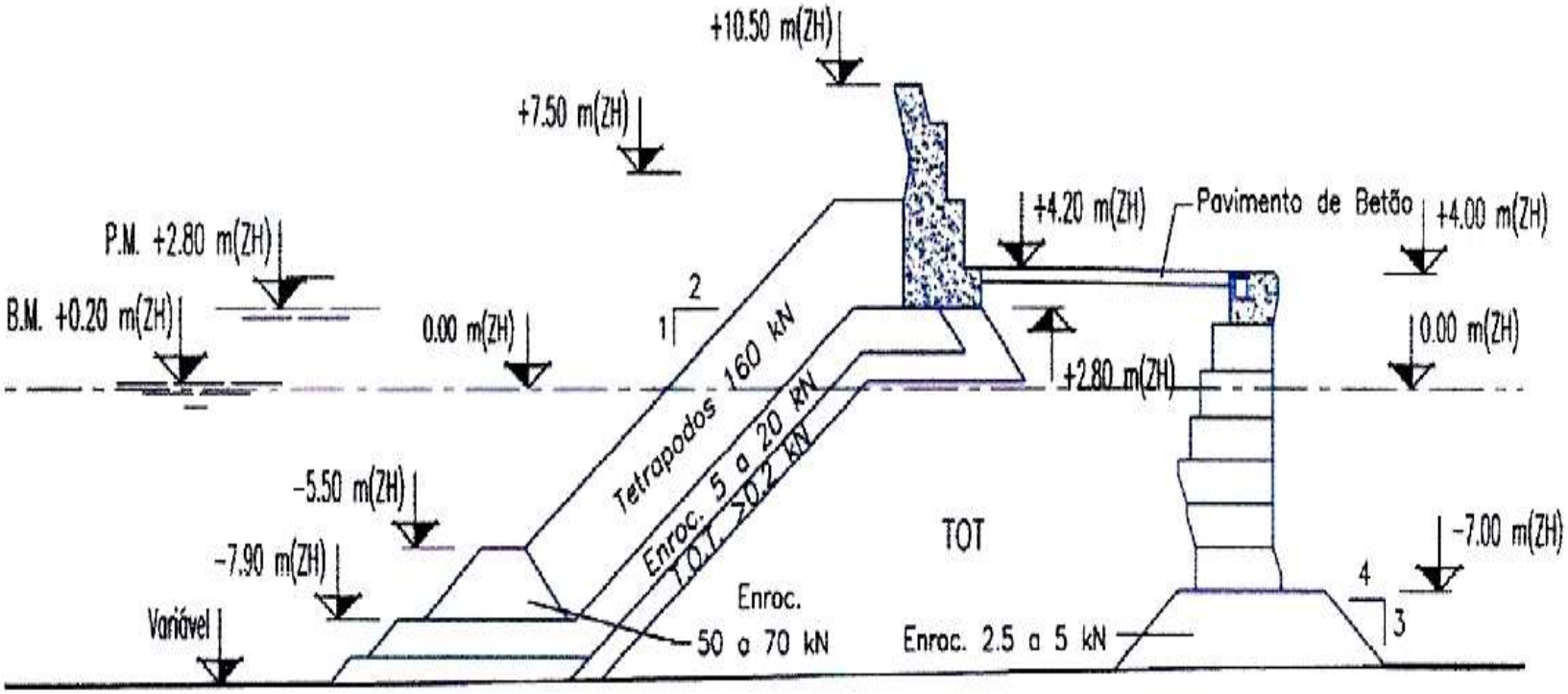

Figura 6.8 – Perfil tipo do molhe (N80°E) (extraído de [56]).

6.4 Diagnóstico da situação que motivou a reparação

Após as inspecções realizadas e os levantamentos efectuados, diversos danos foram detectados, tanto na parte emersa dos molhes quanto na imersa.

Vislumbraram-se várias fissuras longitudinais no pavimento da superstrutura e a degradação de algumas zonas junto ao cais de acostagem, constatando-se ainda que o manto de protecção do troço E-W do referido molhe encontrava-se muito deteriorado e que o muro cortina apresentava uma pequena inclinação no sentido do mar.

Tais situações deveram-se, basicamente, ao assentamento da estrutura, uma vez que a fundação desta perdeu parte do volume de enrocamento do núcleo e dos filtros, devido à degradação de muitos dos blocos de betão que constituíam o manto de tetrápodes, bem como ao afastamento de outros de sua posição original, comprometendo assim a protecção da estrutura, ao deixar zonas com uma única camada ou mesmo sem nenhuma protecção contra a agitação marítima.

No troço do contra-molhe, foram encontrados vários blocos partidos ou deslocados, mas, no entanto, a superstrutura não apresentava danos.

No troço N-S, muitos dos tetrápodes encontravam-se, igualmente, afastados da sua posição inicial ou mesmo partidos (Figura 6.9). Apesar dos danos verificados na estrutura serem menos significativos comparativamente ao restante troço, estes poderiam, futuramente, pôr em causa a protecção dos enrocamentos do filtro e do núcleo, deixando assim a estrutura vulnerável a assentamentos.

Figura 6.9 – Ilustração de tetrápodes partidos (adaptado de [65]).

6.5 Descrição da solução implementada

Após a inspecção e diagnóstico dos problemas dos molhes do porto de abrigo do Porto Santo, seguiu-se a confrontação de todas as soluções possíveis, objectivando escolher aquela mais viável a todos os níveis.

Tendo por base os dados recolhidos e interpolados, os cálculos efectuados com o modelo de Hudson, descrito no AnexoA, indicaram que, para a protecção do manto, fosse este composto por duas camadas de elementos com um peso superior a 280 kN, devendo os enrocamentos adjacentes ter pesos entre os 20 kN e os 30 kN. A verificação dos elementos projectados para o manto protector do molhe principal do porto de abrigo de Porto Santo é apresentada nas Tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 – Verificação das características do enroncamento.

Cálculo do peso do enrocamento		
Dados para cálculo	Peso específico [kN/m^3]	26
	Coef. Forma [–]	1,15
Peso cálculado	**[kN]**	**30**
Peso adoptado	**[kN]**	**25**
Espessura do filtro	[m]	2,3

Tabela 6.5 – Verificação das características do manto de blocos Antifer.

Cálculo do peso dos blocos		
Dados para cálculo (Danos 0 a 5%)	Altura de onda [m]	7,4
	Inclinação do talude[–]	2
	Período médio de onda [s]	16
	Peso específico [kN/m^3]	25
	Número de camadas [–]	2
	Coef. Estabilidade [–]	7
	Coef. Forma [–]	1
Peso calculado	**Fórmula Hudson [kN]**	**280**
Peso adoptado	**[kN]**	**300**
Espessura do manto	[m]	4,6

A solução a construir ficou então definida pela reabilitação do molhe principal e reparação do manto, até então constituído por blocos de betão tipo tetrápode, substituindo-os por blocos cúbicos tipo Antifer, também em betão, com 300 kN. Esta substituição do tipo de blocos nas zonas de maior intensidade da dinâmica marítima objectivou conseguir um manto mais rígido, mais estático e mais duradouro, tornando-se assim mais robusto e menos propício a deslocamentos, diminuindo com isto a probabilidade de rotura dos elementos.

Como nas inspecções e levantamentos efectuados foi constatada a existência de diversos tetrápodes partidos, e tendo em conta que na Ilha do Porto Santo é substancialmente difícil dispor de rochas rígidas e em grandes volumes, esses blocos de betão foram "reciclados" — entenda-se reutilizados de acordo com as características definidas em projecto — juntamente com o enrocamento existente, como mostrado na Figura 6.10, formando com isto um filtro com um mínimo de 2,3 m de espessura, constituído por uma camada de enrocamento formada por unidades com 20 kN a 30 kN.

Sobre este enrocamento, pretendia-se a colocação de blocos Antifer de 300 kN, cada um com um volume de betão de 12,5 m^3, formando duas camadas com inclinação de 2:1, sendo a berma igualmente constituída pelo mesmo tipo de blocos.

Figura 6.10 – Pedaços dos tetrápodes partidos usados no enrocamento.

Por se tratar de uma zona crítica da estrutura marítima, a cabeça do molhe também foi protegida por meio da substituição dos tetrápodes originais por blocos Antifer, como mostrado na Figura 6.11.

Figura 6.11 – Cabeça do molhe protegida por blocos Antifer (à esquerda) e detalhe dos blocos de protecção (à direita).

Pelo facto da Ilha do Porto Santo situar-se numa zona em que a agitação marítima não é considerada muito elevada, a cabeça do molhe não foi protegida de maneira uniforme, sempre à mesma cota, com os blocos de betão.

Se este não fosse o caso, por uma questão de segurança, deveria ter sido realizado um estudo por meio de um modelo físico, de modo a obter melhor informação quantitativa sobre a estabilidade e permitir a identificação da zona mais crítica do manto, como exemplificado na Figura 6.12, possibilitando assim a escolha da melhor geometria para a cabeça da estrutura.

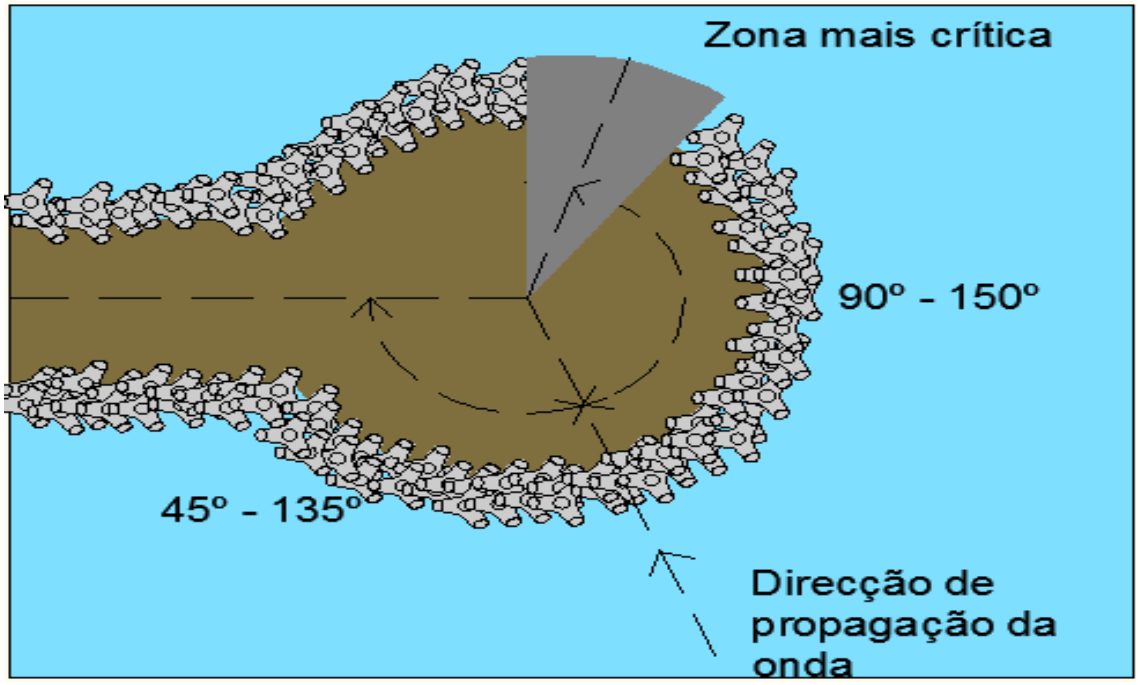

Figura 6.12 – Zona mais crítica para o manto da estrutura (adaptado de [66]).

No entanto, o molhe do Porto do Porto Santo não possui uma estrutura completamente linear, pois apresenta um pequeno aumento do comprimento transversal na cabeça do molhe, como se pode observar na Figura 6.13.

Na maior parte das situações, a zona mais crítica da cabeça da estrutura pode ser melhor protegida por meio do aumento do diâmetro da secção frontal ou pelo seu prolongamento no sentido preponderante de incidência das ondas, tal como ilustra a Figura 6.14, soluções estas que proporcionam uma diminuição da altura das ondas por difracção, reduzindo assim o efeito da sua acção sobre a estrutura [66].

Figura 6.13 – Aumento da secção na zona da cabeça do molhe.

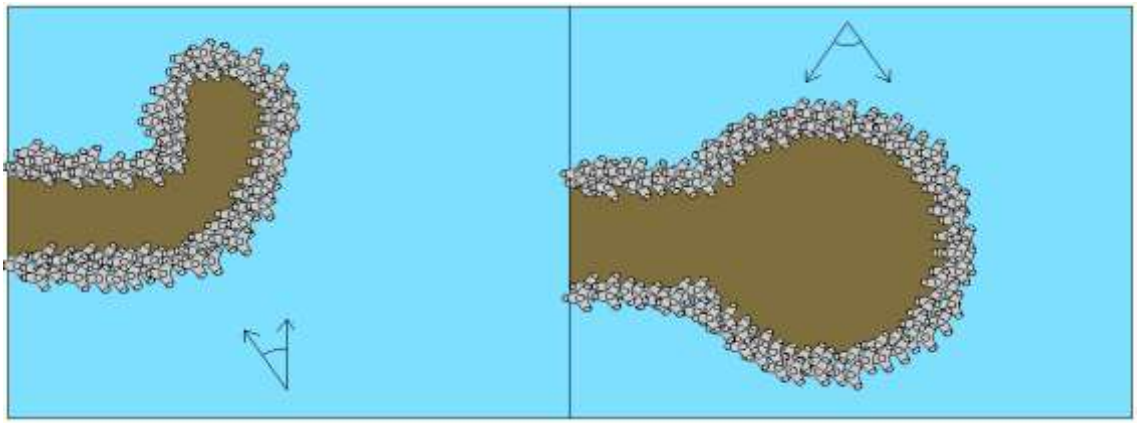

Figura 6.14 – Possíveis soluções para a redução de danos na cabeça da estrutura (adaptado de [66]).

A colocação dos blocos Antifer ao longo do manto, com a configuração apresentada na Figura 6.15, solução adoptada no Porto Santo, contribuiu para a estabilidade do muro de cortina e possibilitou a obtenção de um filtro poroso mas, ao mesmo tempo, mais capaz de impedir o escape de enrocamento do núcleo do que a solução pré-existente.

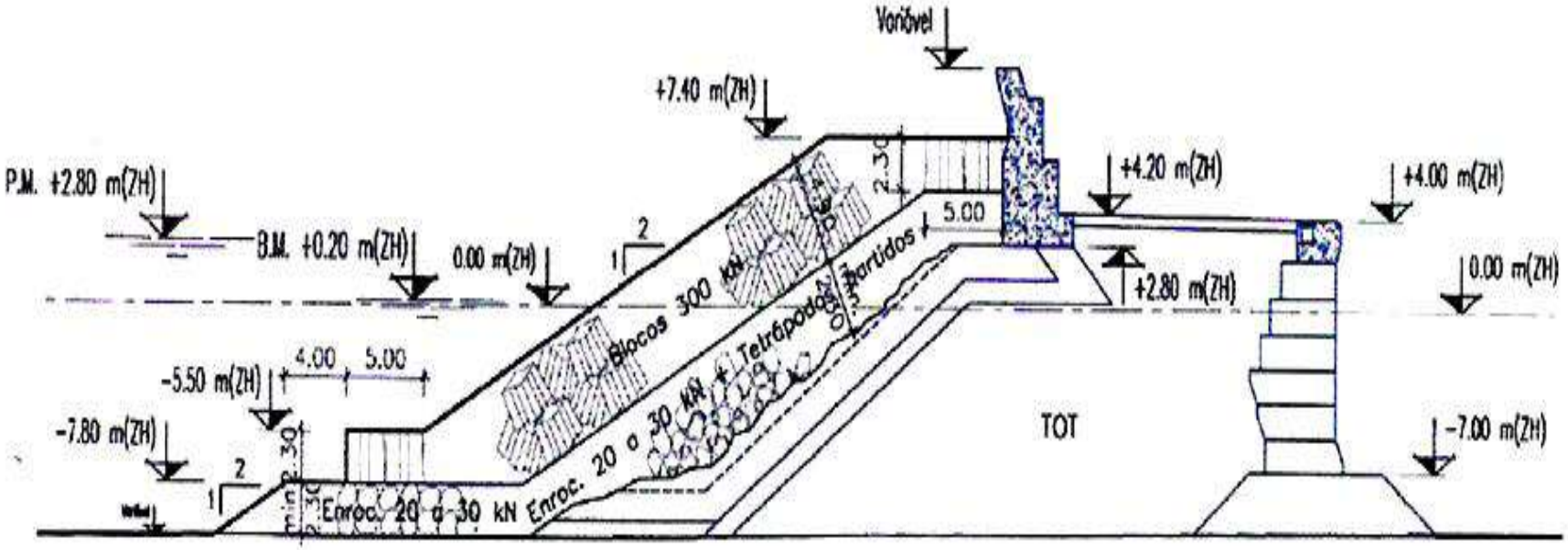

Figura 6.15 – Ilustração do perfil de reconstrução (extraído de [56]).

Em relação ao troço N-S e ao contra-molhe, zonas menos expostas à acção da agitação marítima, não se justificando a substituição do tipo original de blocos, procedeu-se apenas à sua reorganização e à substituição de alguns blocos partidos, obtendo-se desta forma um perfil estável com os tetrápodes de 10 ton.

A fronteira entre os tetrápodes e os blocos Antifer, de maior peso, ficou situada próximo ao final do troço N-S, como mostrado na Figura 6.16, o que não seria possível caso se tratasse de uma zona mais fustigada pela agitação marítima, quando seria mais prudente que a fronteira se situasse mais junto à costa.

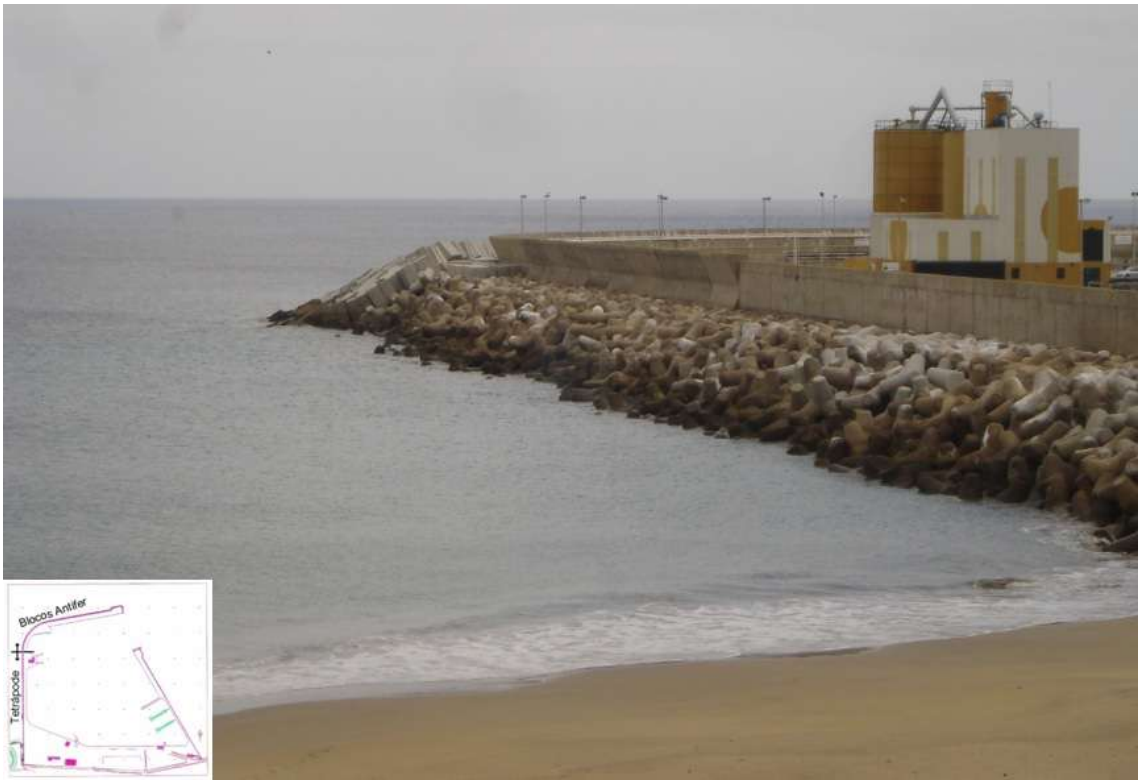

Figura 6.16 – Indicação do tipo e da localização dos blocos de betão utilizados no manto para a reabilitação do molhe.

Existem duas configurações possíveis, côncavas ou convexas, para os molhes que apresentam uma mudança acentuada de direcção ao longo de sua extensão, como ilustrado na Figura 6.17, sendo o molhe principal do porto do Porto Santo do tipo convexo.

Em função da configuração, devem ser terminados o tipo e o peso dos blocos, o seu posicionamento, bem como a espessura da camada de protecção, uma vez que os blocos situados nas esquinas do tipo convexo estão mais expostos à dinâmica marítima, enquanto os blocos a eles lateralmente vizinhos estão sujeitos a menos esforços. Nas estruturas do tipo côncavo, os blocos de protecção usualmente estão mais expostos à concentração das ondas por reflexão oblíqua [66].

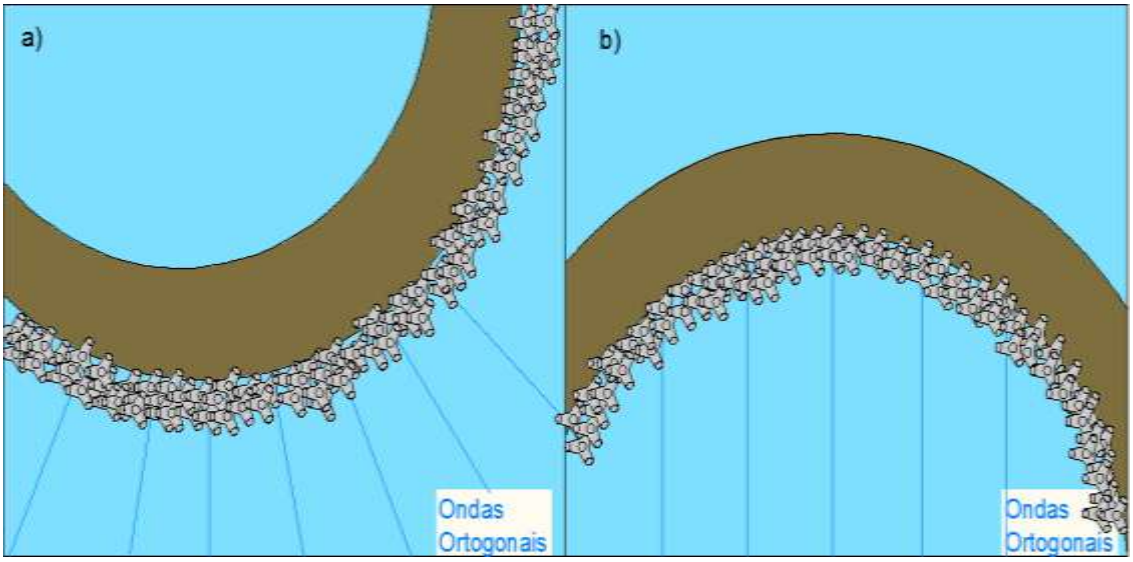

Figura 6.17 – Tipos de cantos expostos às ondas: a) convexo; b) côncavo (adaptado de [66]).

Antes das obras de reparação, a superstrutura do molhe apresentava fissuras longitudinais e degradação no término do cais de acostagem dos navios (Figura 6.18), tendo se procedido à reparação e selagem com betão C35/45 e com um ligante epoxídico estrutural, capaz de afiançar a aderência do novo betão ao antigo.

Figura 6.18 – Fissuras e degradação na superstrutura (extraído de [56]).

Os blocos do tipo tetrápode já existentes e em boas condições foram retirados do molhe principal e recolocados no contra-molhe, tendo sido fabricados no mesmo modelo os demais blocos necessários para a protecção do contra-molhe, como descrito na Secção 6.6.

Para além dos trabalhos antes mencionados, o projecto de execução envolveu alterações e outras construções na zona de acesso ao porto, como, por exemplo, drenagens, muros de contenção e instalações eléctricas, que, não sendo o foco de interesse deste trabalho, não serão aqui discutidas.

6.6 Ordem de trabalhos

Tratando-se de uma obra com uma dimensão razoável e a decorrer durante 18 meses, estabeleceu-se um consórcio entre várias empresas, nomeadamente ETERMAR – Engenharia e Construção S.A., SOMAGUE – Engenharia S.A., Seth – Sociedade de Empreitadas e Trabalhos Hidráulicos, S.A. e Construtora do Tâmega S.A., tendo sido o projecto da responsabilidade da WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A. e tendo a obra como promotor a APRAM – Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira, S.A..

A obra iniciou-se em Janeiro de 2007, tendo sido os primeiros dias de trabalho dedicados à consignação e à criação de um rigoroso plano de segurança e saúde, capaz de evitar, tanto quanto possível, qualquer risco para os intervenientes directos na obra, bem como para os demais utilizadores da via marítima, uma vez que o porto continuou em funcionamento, com algumas ressalvas.

A definição do local e a montagem do estaleiro, incluindo a mobilização do equipamento, foi primeiro executada, ocorrendo em seguida a montagem das instalações, logo após a finalização do plano de segurança e saúde.

Posteriormente, seguiram-se trabalhos preparatórios, designadamente a execução de levantamentos topo-hidrográficos e de inspecções submarinas, capazes de proporcionar resultados que confirmassem os dados recolhidos no ano de 2005 ou a existência de eventuais alterações, de modo a que as mesmas pudessem ser rectificadas e tidas em conta pelo director da obra aquando da sua execução.

A actividade seguinte foi a pré-fabricação de blocos Antifer e dos blocos tetrápodes, que apresentou um rendimento variável entre os dez e os 12 blocos por dia, não tendo sido o ritmo de produção de blocos superior devido às limitações da produção diária de betão na Ilha do Porto Santo.

Para esta actividade, primeiramente o terreno escolhido para a colocação dos moldes foi aplainado e coberto com areia, com o auxílio de uma retroescavadora, tendo sido os moldes em seguida colocados de forma ordenada, conseguindo-se assim um melhor aproveitamento do espaço e uma maior facilidade de manuseamento dos equipamentos.

A betonagem foi feita de forma directa pelas autobetoneiras, que, por meio de uma rampa metálica movida de molde para molde por uma grua móvel, conseguiam chegar ao topo dos moldes, possibilitando com isto uma betonagem eficiente. Os moldes utilizados foram também adaptados, de forma a criar uma guarda para a protecção dos trabalhadores e a estabelecer uma ligação de passagem entre os mesmos, como mostrado na Figura 6.19.

Figura 6.19 – Betonagem dos dois tipos de blocos de betão usados no manto do molhe.

Após a betonagem, os espaços vazios remanescentes foram eliminados com a aplicação de um vibrador alimentado por um gerador. A descofragem dos moldes metálicos (Figura 6.20) foi efectuada passado algum tempo, após o betão já apresentar uma certa consistência.

O passo seguinte foi a cura do betão, garantida pela rega abundante dos blocos com água bombeada de um poço de armazenamento construído nas proximidades, evitando, desta forma, a sua desidratação descontrolada.

Quatro a seis dias após a betonagem, quando os blocos já apresentavam alguma resistência mecânica, estes eram retirados da zona de fabrico e transportados para a zona de stock, até atingirem a resistência final especificada no projecto.

Este ciclo de pré-fabricação de blocos decorreu ao longo de cerca de um ano, período no qual decorreram diversas actividades, sendo uma das mais importantes a montagem do pórtico com grua. A grua amovível utilizada, TWH Manitowoc 4100 Ringer, foi adaptada para se movimentar sobre dois carris, apoiados um sobre o pavimento do porto e outro sobre o muro cortina (Figura 6.21), cuja construção, devido aos assentamentos, algumas imperfeições verificadas no molhe e às características do equipamento, implicou um trabalho minucioso auxiliado por métodos topográficos.

Figura 6.20 – Desmoldagem dos tetrápodes.

Figura 6.21 – Grua principal de remoção e colocação de elementos constituintes do manto no molhe principal.

À medida que os trabalhos foram decorrendo, a execução dos carris procedeu-se sempre de forma antecipada, de modo a permitir que a grua pudesse se deslocar acompanhando o avanço da frente de colocação dos blocos. Os carris metálicos foram chumbados e aparafusados no muro de cortina sobre um perfil em L invertido e apoiados no porto sobre uma viga em betão armado propositadamente construída para o efeito.

A opção pelo apoio da grua sobre um pórtico deveu-se ao maior alcance que esta poderia atingir e, consequente, sua melhor capacidade para a colocação dos blocos de betão na posição indicada no projecto.

Outra solução seria a colocação do material no manto através de meios marítimos — como, por exemplo, batelões, pontões ou gruas flutuantes —, havendo diversos meios para atingir tal fim, embora tenham estes custos de manutenção, tempos de execução e formas de aplicação diferentes, o que realça a importância da escolha acertada dos equipamentos para que o progresso das obras marítimas possa decorrer sem que sucedam falhas de execução que implicam, inevitavelmente, derrapagens orçamentais.

No manto do molhe principal, foram primeiramente retirados pela grua os blocos de betão existentes, do tipo tetrápode, tendo sido estes transportados por camiões para a zona de armazenamento do estaleiro, onde foram inspeccionados individualmente e, conforme seu estado de conservação, decidido o seu destino. Os tetrápodes que se apresentaram capacitados para a função a que se destinam, foram armazenados para, posteriormente, serem recolocados no manto protector do molhe, tendo sido os demais blocos encaminhados para uma outra zona, onde foram quebrados, dando origem a blocos mais pequenos a serem utilizados no enrocamento do manto.

Em seguida, procedeu-se a trabalhos de dragagem, objectivando nivelar e preparar a zona de assentamento dos blocos, na qual se verificou um aumento dos volumes à medida com a aproximação à costa, tal como indicavam previamente os estudos de batimetria.

Após as dragagens, realizou-se o reperfilamento do enrocamento com os tetrápodes partidos e com rochas basálticas, rochas estas muito melhores que as de natureza sedimentar existentes anteriormente, uma vez que várias destas encontravam-se desfeitas ou quebradas, não cumprindo as características estipuladas. O depósito de enrocamento realizado pela grua, por meio de uma caixa metálica (Figura 6.22), foi posteriormente nivelado e corrigido por uma escavadora hidráulica Caterpillar 320.

Figura 6.22 – Depositação de enrocamento por meio da grua.

Para concluir o manto, foram depositados pela grua os dois tipos de blocos, consoante a zona definida no projecto, sendo utilizada, no caso dos blocos Antifer, uma garra denominada canga, conforme mostrado na Figura 6.23.

De notar que, em nenhum dos tipos de blocos, foram acoplados os usuais ganchos metálicos frequentemente utilizados para movimentar e manusear os blocos, a fim

de evitar que, com o passar do tempo, estes, ao reagirem com a água, pudessem se oxidar, dando origem a um ponto de possível destruição do próprio bloco.

Figura 6.23 – Colocação dos blocos Antifer com a canga.

Nas zonas em que os blocos ficaram submersos, a orientação para o correcto posicionamento dos mesmos foi assegurada por dois mergulhadores, com a utilização de bóias, sendo estes auxiliados por um operador a bordo de uma lancha, responsável pela ponte de comunicação com o operador da grua.

Uma outra possibilidade para o correcto posicionamento dos blocos, de acordo com as coordenadas que constam no projecto, seria acoplar um GPS à grua, não sendo neste caso necessário o auxílio da lancha.

Finalizado o primeiro troço, com aproximadamente 30 m, foi repetido todo o processo, desde o alinhamento dos carris até à colocação dos blocos de betão, tendo assim a reabilitação do molhe ocorrido de forma faseada e não por actividade.

A reparação do contra-molhe, incluindo a substituição dos blocos tetrápodes e demais actividades, seguiu um procedimento idêntico ao adoptado para o molhe principal, residindo a diferença basicamente na não necessidade de trabalhos de dragagem e no equipamento empregue, não tendo sido neste caso utilizada a grua TWH Manitowoc 4100 Ringer, mas sim o modelo NCK AJAX, implicando menos trabalhos de topografia para a colocação dos carris.

Procederam-se, ainda, a demolições e remoções de material em algumas zonas danificadas do molhe principal que necessitavam de reparação da superstrutura, em decorrência de assentamentos ou desgastes provocados pela atracação de navios (R. E. Q. Nunes, comunicação pessoal, 2010).

6.7 Meios, quantidades e volumes utilizados

6.7.1 Volumes e quantidades de material

A reparação efectuada no porto de abrigo do Porto Santo envolveu a utilização de muitos recursos materiais e humanos, tal como ocorre com a maior parte das obras marítimas.

Em relação aos blocos de betão constituintes do manto protector, foram removidos e posteriormente recolocados 1.502 unidades de tetrápodes de 100 kN e fabricadas e colocadas outras 270 unidades do mesmo tipo, com o mesmo peso, num total de 1.130 m^3 de betão.

No troço previsto para substituição do tipo de blocos, foram fabricadas e colocadas 4.000 unidades de blocos cúbicos Antifer de 300 kN, num total de 50.875 m^3 de betão. A quantidade de blocos utilizados encontra-se sumarizada na Tabela 6.6.

Para as diversas camadas de enrocamento, foram colocados 58.582 m^3 de rochas basálticas com pesos entre 20 kN e 30 kN e mais 2.550 m^3 do mesmo tipo de rochas com pesos a variar entre 0,5 kN e 1,5 kN.

Tabela 6.6 – Resumo de quantidades de blocos de betão (extraído de [58]).

Tipo de Material	Unidades	m^3
Blocos removidos (Tetrápodes 100 kN)	1502	6286
Blocos fabricados (Tetrápodes 100 kN)	270	1130
Blocos fabricados (Antifer 300 kN)	4000	50875
Total	5772	58291

A reabilitação do núcleo, em decorrência do escape de material, exigiu cerca de 1.540 m^3 de material com peso inferior a 0,5 kN.

Os enrocamentos depositados no manto provieram de uma exploração feita propositadamente para obra em questão. Apesar das formações sedimentares serem significativas na Ilha do Porto Santo [87], a pedreira localizou-se sobre um estrato de basalto, rocha muito dura, ideal para o enrocamento do molhe (R. E. Q. Nunes, comunicação pessoal, 2010).

As dragagens realizadas foram responsáveis pela movimentação de 23.453 m^3 de material, encontrando-se todos estes valores resumidos na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resumo de quantidades de material compósito do núcleo (extraído de [58]).

Tipo de Material	m^3
Enrocamento (20 kN e 30 kN)	58582
Enrocamento (0,5 kN e 1,5 kN)	2550
Enrocamento (< 0,5 kN)	1540
Material dragado	23453
Total	86125

6.7.2 Meios humanos e equipamentos

A obra foi dirigida permanentemente por dois engenheiros, responsáveis pelo controlo de produção, tendo como principal função assegurar que a preparação e execução da obra seguisse rigorosamente o projecto, bem como controlar os custos orçamentados, sendo ainda responsáveis por toda a logística envolvida, incluindo

os equipamentos, o estaleiro, os recursos humanos e as compras necessárias. Estes foram auxiliados *in situ* por um encarregado geral e por um técnico de higiene e segurança.

A actividade de fabrico dos blocos em betão, do tipo Antifer e tetrápodes, envolveu directamente 12 homens, quatro deles — dois pedreiros e dois serventes — directamente envolvidos no processo de betonagem. Estes tinham por função garantir o posicionamento correcto dos moldes e da rampa, de modo a proporcionar a betonagem directa, bem como acelerar a saída do betão quando este não apresentava a fluidez desejada. No entanto, é de notar que esta eventual menor fluidez proporcionou obter resistências superiores em menos tempo, permitindo com isto a descofragem precoce e, por conseguinte, um melhor rendimento na produção diária dos blocos. Estes quatro trabalhadores tinham também por função reduzir os espaços vazios do betão com o emprego de um vibrador alimentado por um gerador.

Após o betão ganhar alguma consistência, procedia-se à descofragem dos blocos e à limpeza dos moldes com óleo específico, sendo os blocos colocados nos camiões por meio de gruas móveis, existindo dois motoristas responsáveis pelo transporte dos blocos para a zona de armazenamento, onde eram convenientemente hidratados com a ajuda de uma bomba de água.

No fabrico dos blocos, foram empregues 12 moldes de Antifer e quatro moldes de tetrápodes, que foram betonados por uma frota composta por quatro autobetoneiras, o que implicou que existissem outros tantos motoristas para tal tarefa. A movimentação dos moldes, dos blocos e da rampa deveu-se ao permanente contributo de duas gruas móveis, como mostra a Figura 6.24, manobradas por outros dois homens.

A fase da substituição dos enrocamentos e da colocação dos blocos no molhe principal envolveu a maior máquina da obra, isto é, a grua TWH Manitowoc 4100 Ringer, que foi minuciosamente norteada por uma equipa de topografia, constituída por um topógrafo e um porta-miras, tendo a construção do pórtico para a grua sido executada por dois pedreiros e dois serventes.

Figura 6.24 – Movimentação dos blocos tetrápodes visando seu armazenamento.

Todo o material removido, bem como o que foi substituído, foi movimentado com o auxílio da referida grua. O enrocamento foi depositado na caixa metálica por uma pá carregadora (Figura 6.25), operada por um manobrador, sendo em seguida movido pela grua. Posteriormente, o enroncamento foi nivelado por uma escavadora de lagartas Caterpillar 320, igualmente operada por um manobrador. A mesma grua foi também utilizada na colocação dos blocos que iriam constituir o novo manto resistente, blocos estes transportados até ao local por camiões.

No caso dos blocos definidos para ficarem submersos, a orientação para o seu correcto posicionamento foi dada por dois mergulhadores, auxiliados por uma lancha, conduzida pelo mesmo homem encarregue de fazer a ponte de comunicação com o operador da grua.

Na reparação do contra-molhe, os meios humanos e o equipamento mobilizado foram basicamente os mesmos, exceptuando o emprego da grua NCK AJAX no lugar da grua TWH Manitowoc 4100 Ringer, utilizada no molhe principal.

Figura 6.25 – Pá carregadora a depositar rochas na caixa metálica.

Devido à escassez de material rochoso adequado às especificações do projecto a custos suportáveis, ouve a necessidade de encontrar uma solução económica e temporal que fosse viável. Foram consideradas várias hipóteses, incluindo a colocação de um enrocamento constituído por uma rocha menos dura ou o transporte de basalto da Ilha da Madeira, entre outras soluções, porém nenhuma se mostrou tão viável quanto a possibilidade de extracção de rocha de um filão existente na própria Ilha do Porto Santo.

Inicialmente, o trabalho de extracção de rocha foi executado com duas máquinas Caterpillar 325, uma de balde e outra de martelo, capazes de quebrar e colocar o material rochoso nos quatro camiões responsáveis pelo seu transporte até ao estaleiro na zona do porto, tendo no entanto havido a necessidade, com o decorrer da obra, de aumento da produção, o que implicou mobilizar mais uma máquina Caterpillar 325, neste caso de martelo. Cabe por último referir que, após a execução destes trabalhos, houve o cuidado de se proceder ao aterro do local de extracção, apresentado o terreno um perfil idêntico àquele anterior à exploração (R. E. Q. Nunes, comunicação pessoal, 2010).

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Principais conclusões do estudo realizado

Sendo este um trabalho que tem como objectivo principal o estudo de obras marítimas de acostagem, tendo como caso de estudo o porto de abrigo da Ilha do Porto Santo, no Arquipélago da Madeira, ficará restrito à obra de reabilitação do referido porto o escopo das conclusões e considerações a seguir expostas.

Como pontos menos positivos, pode inicialmente referir-se a utilização de dados da bóia-ondógrafo fundeada ao largo do Porto do Funchal, na Ilha da Madeira, para a estimação, com o modelo Mike 21 NSW, do estado do mar na zona do porto em estudo, situado na Ilha do Porto Santo, que apresenta características distintas e está dela distante cerca de 44 km.

Além disso, a adopção do modelo simplificado de Hudson, com o emprego de tais dados aproximados, tornou o cálculo das características dos blocos de betão para a protecção da estrutura de acostagem um tanto menos confiável do que o dimensionamento que seria possível caso os dados utilizados com o referido modelo fossem resultantes de uma campanha prévia de medição de ondas *in situ*, sempre desejável porém neste caso não executada.

Embora os modelos de simulação numérica de ondas, como o Mike 21 NSW, possam apresentar resultados bastante aceitáveis, nomeadamente para fins de dimensionamento de estruturas costeiras e oceânicas, os modelos físicos continuam a ser necessários para a calibração dos parâmetros e a validação dos resultados por eles fornecidos [89], sendo assim de referir a ausência de experiências em modelo reduzido aquando da execução do projecto das obras de reparação do porto de abrigo do Porto Santo.

De acordo com as informações que foi possível obter, parece também não ter havido a preocupação de realizar um exaustivo estudo do transporte litoral de

sedimentos na costa sueste da Ilha do Porto Santo aquando da implantação dos molhes, estudo este que seria indispensável para assegurar a minimização do impacte da presença da estrutura de acostagem, fundamental por se tratar de uma ilha cujo desenvolvimento económico assenta-se, de forma muito significativa, na vertente turística, que inevitavelmente está relacionada com as condições do extenso areal que a ela dá notoriedade.

O projecto de estruturas marítimas e portuárias usualmente requer o conhecimento dos parâmetros das ondas incidentes, do nível do mar e das feições batimétricas. No entanto, as simulações numéricas realizadas não tiveram em conta o efeito das correntes costeiras e de maré no padrão de ondas no porto e na zona costeira adjacente, estudo este que seria possível com o emprego do Mike 21 BW – Boussinesq Wave Module, embora o mesmo possa mostrar-se relativamente pouco sensível às variações da batimetria [90].

Em particular, poderiam ter merecido uma melhor avaliação quanto à adequação da solução implementada, idealmente com o emprego combinado de modelação física e numérica, a localização da fronteira entre os diferentes tipos de blocos de betão, que foi determinada empiricamente, e a protecção da cabeça do molhe principal, zona esta especialmente crítica para a estrutura.

De entre os pontos menos positivos relativamente aos processos de construção adoptados, pode referir-se primeiramente a não utilização de um GPS diferencial acoplado à grua principal, o que tornaria dispensável a utilização da lancha de apoio e permitiria um posicionamento mais preciso dos blocos.

Outra medida que poderia ter sido implementada com melhores resultados seria o emprego de uma manta geotêxtil entre o núcleo e a camada adjacente do manto de protecção, o que poderia impedir a fuga dos materiais mais finos constituintes do núcleo, minimizando com isto o risco de indesejáveis assentamentos, como os verificados antes das obras de reabilitação.

Em vista das limitações na produção diária de betão na Ilha do Porto Santo, que constituiu uma forte condicionante em termos de prazo para a consecução da obra em função da grande demanda, uma solução mais adequada poderia ter sido conjugá-la com uma produção própria, por meio da criação e operação de uma pequena central de betão naquela ilha durante a execução dos trabalhos de reabilitação.

Quanto aos aspectos positivos, pode destacar-se primeiramente a realização de novos levantamentos topo-hidrográficos e inspecções submarinas em 2008, aquando da execução dos trabalhos de reparação, pois, como referido no Capítulo 2, tais actualizações proporcionam a antecipação de eventuais imprevistos e permitem reformulações atempadas e a escolha de soluções alternativas mais viáveis e adequadas aos cenários encontrados.

O depósito directo do betão nos moldes, com recurso a uma rampa metálica para o nivelamento da autobetoneira ao nível do topo dos moldes, mostrou-se, igualmente, uma solução muito eficiente, por propiciar uma maior rapidez na betonagem, minimizar os meios humanos mobilizados e evitar as alterações nas propriedades do betão que ocorreriam caso o processo demandasse mais tempo.

A opção pelo não acoplamento dos usuais ganchos metálicos nos dois tipos de blocos de betão produzidos, normalmente empregues na sua movimentação, mostrou ser também uma escolha acertada, por evitar a degradação dos blocos em decorrência da oxidação do metal de que são feitos.

A criação do pórtico com os perfis metálicos em L, para apoio da grua utilizada na remoção e colocação dos elementos constituintes do manto no molhe principal, foi uma solução engenhosa e adequada, embora, como alternativa, pudesse ter sido considerada a colocação do material no manto com recurso a meios marítimos. No entanto, há que ter em conta que esta alternativa poderia ter sérias implicações em termos de operacionalidade dos meios a serem empregues e do próprio porto durante os trabalhos de reabilitação.

O emprego de uma grua de menor porte na reparação do contra-molhe evitou os trabalhos adicionais de preparação necessários no molhe principal, mostrando ser uma solução economicamente mais interessante e igualmente eficaz.

A execução faseada das obras de reabilitação dos molhes — feita com a retirada parcial dos elementos de protecção, seguida do correspondente reperfilamento do manto e recolocação dos blocos de betão no troço em questão — propiciou uma maior segurança à estrutura, pois, no caso de ocorrência de uma tempestade durante os trabalhos, a integridade do todo nunca seria colocada em causa, mesmo existindo um troço sem os blocos de protecção. Além disto, a opção pela execução da reabilitação dos molhes por etapas, correspondendo cada uma delas a um troço com cerca de 30 metros de extensão, proporcionou uma melhor gestão do estaleiro, visto que muitas vezes é extremamente difícil dispor de espaço suficiente para o armazenamento dos volumosos blocos de betão a serem mais tarde empregues nas obras de reparação.

Outra opção acertada, tanto em termos económicos quanto técnicos, foi a da extracção de rocha de um filão basáltico existente na própria ilha do Porto Santo, ao invés do recurso ao transporte de rocha basáltica extraída na vizinha Ilha da Madeira ou do emprego de um tipo de rocha menos capaz.

O reperfilamento do enroncamento com rochas basálticas, em lugar das rochas de natureza sedimentar antes existentes, conferiu ao manto de protecção da estrutura de acostagem uma maior resistência à acção das ondas e às forças de compressão provocadas pelos blocos de betão, aumentando com isto a sua durabilidade comparativamente com a solução anterior.

Além do emprego de rochas basálticas, é conveniente destacar como ponto favorável, tanto a nível económico como ambiental, a reutilização, no enroncamento, dos tetrápodes que se encontravam danificados, tendo sido tais blocos partidos de modo a se adequarem às especificações do projecto.

Para finalizar, cabe ainda ressaltar, como acção igualmente positiva do ponto de vista ambiental, o cuidado em proceder ao aterro do local de extracção de rocha, de modo a manter um perfil idêntico ao anterior à exploração.

7.2 Sugestões de trabalho futuro

Como um possível primeiro tema de investigação posterior a este trabalho, pode referir-se a possibilidade de desenvolvimento de um estudo detalhado e profundo, envolvendo modelação física e simulação numérica — não sendo ainda de descartar a possibilidade da eventual assimilação, pelo modelo numérico escolhido, de dados de ondas e de ventos fornecidos pela altimetria por satélite [91] — objectivando melhor caracterizar a agitação marítima, o efeito da interacção entre as ondas de superfície e as correntes de maré e o transporte de sedimentos na zona de implantação do porto e, com isto, poder proceder à efectiva confirmação dos valores dos parâmetros utilizados no dimensionamento da estrutura de acostagem e da sua protecção, bem como analisar o impacte por ela provocado e os efeitos de uma possível ampliação do molhe principal, não só em termos ambientais, mas também na operacionalidade do referido porto, nomeadamente durante os períodos em que as condições do mar são mais adversas.

Para concluir, outro possível tema a abordar num trabalho futuro seria uma análise do efeito do emprego de diferentes tipos de blocos de betão, não apenas em termos económicos, mas também em relação à eficiência da protecção da estrutura de acostagem, envolvendo a utilização de modelação física e o emprego de diferentes métodos de dimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Frederick, J. B. e E. Hecht, *Schaum's outlines – Física*, 9ª ed., McGraw-Hill, Lisboa, 2001.

[2] Alfredini, P. e E. Arasaki, *Obras e gestão de portos e costas*, 2ª ed., Editora Blucher, São Paulo, 2009.

[3] Sanjaume, E. e J. F. Mateu*, Geomorfologia litoral i cuaternari,* Publicacions de la Universitat de València, València, 2006.

[4] CERC, Armor unit placement method versus stability coefficients, *Coastal Engineering Technical Note CETN-III-4 (Revised)*, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1985.

[5] Reis, A. J., *Dimensionamento de estruturas*, Folhas da disciplina, Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, s. d.

[6] Van der Meer, J. W., Stability and transmission at low-crested structures, *Delft Hydraulics Publication 453*, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands, 1991.

[7] Forest Products Laboratory, *Wood handbook – Wood as an engineering material*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1999.

[8] Crawford, R. J., *Plastics engineering*, 3ª ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1998.

[9] Selecções do Reader's Digest, *Dicionário Mais – das ideias às palavras*, Lisboa Editora, Lisboa, 2002.

[10] Smith, W. F., *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*, 3ª ed., McGraw-Hill, Lisboa, 1998.

[11] Ferreira Gomes, L. M., Geotêxteis e suas aplicações, in *Seminário UBITEX sobre Geotêxteis: A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação*, p. 10-20, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2001.

[12] Coutinho, A. S., *Fabrico e propriedades do betão*, v. 1, LNEC, Lisboa, 1988.

[13] APEB, *Guia para a utilização da norma NP EN 206-1: A especificação do betão*, 4ª ed., Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, Lisboa, 2008.

[14] Murdock, L. J. e G. F. Blackledge, *Concrete materials and practice*, E. Arnold, London, 1979.

[15] Rex pumpcrete practice: *A manual of pipe line concreting methods*, 3ª ed., Chain Belt Company, Milwaukee, WI, 1948.

[16] Coutinho, A. S., *Fabrico e propriedades do betão*, v. 2, LNEC, Lisboa, 2006.

[17] McCrum, N. G., C. P. Buckley e C. B. Bucknall, *Principles of polymer engineering*, 2ª ed., Oxford University Press, New York, 1997.

[18] Brown, H., A. Panshin e C. Forsaith, *Textbook of wood technology: Structure, identification, defects and uses of the commercial wood of the United States*, vol. 1, McGraw-Hill, New York, 1949.

[19] Disponível em http://www.revistatechne.com.br/edicoes/110/imagens/atedebaixodagua4.jpg, consultado em 13 de Abril de 2010.

[20] Disponível em http://www.pbase.com/adjacircidrao/image/81289584, consultado em 13 de Abril de 2010.

[21] Disponível em http://www.maccaferri.com.br/informativo/2009/img_cases/12/dica.jpg , consultado em 13 de Abril de 2010.

[22] Disponível em http://1.bp.blogspot.com/_9PaTrjFxTKI/S6pmafVnGbI/AAAAAAAAA70/e_9voNAOdWM/s1600/CIMG2219.JPG, consultado em 13 de Abril de 2010.

[23] Lança, P., Materiais de construção – Introdução às madeira, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, disponível em http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Sub-paginas/MatConst_apoio_files/ppt/Madeiras_propriedades.pdf, consultado em 23 de Abril de 2010.

[24] Melby, J. A. e G. F. Turk, Core-Loc™ concrete armour units: Technical guidelines, *Miscellaneous Paper CHL-97-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1997.

[25] NP EN 1992-1-2: *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão*, 2004.

[26] Agerschou, H., *Planning and design of ports and marine terminals*, 2ª ed., Thomas Telford, London, 2004.

[27] Disponível em http://www.xbloc.com/products/eco-xbloc, consultado em 16 de Julho de 2010.

[28] Clifford, J. E. (Ed.), *Advances in coastal structures and breakwaters*, Thomas Telford, London, 1996.

[29] Disponível em http://hmrc.ucc.ie/seminars/Flood_%20Defences/coastal%20Structures%20Wiliam%20Allsop.pdf, consultado em 14 de Maio de 2010.

[30] Mohan, R. K., O. Magoon e M. Pirrello (Eds.), *Advances in coastal structure design*, American Society of Civil Engineers, New York, 2003.

[31] Disponível em http://peterdawson.typepad.com/photos/holland/dike.JPG, consultado em 20 de Maio de 2010.

[32] Disponível em http://www.youngreporters.org/article-imprim.php3?id_article=2385, consultado em 21 de Maio de 2010.

[33] Disponível em http://e-porteflio.blogspot.com/2009/02/ocupacao-antropica-da-faixa-litoral.html, consultado em 20 de Maio de 2010.

[34] Disponível em http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Seawall_Vancouver.jpg, consultado em 21 de Maio de 2010.

[35] Disponível em http://www.geotechnics.mottmac.com/scaled/727cd3fd.jpeg, consultado em 21 de Maio de 2010.

[36] Disponível em http://www.coastlineconsulting-ct.com/images/bs2.gif, consultado em 16 de Junho de 2010.

[37] Disponível em http://www.lacoast.gov/articles/bps/2/RaccoonIslandBefore.jpg, consultado em 16 de Junho de 2010.

[38] Disponível em http://images.surfingmagazine.com/news/surfing-pulse/reef-photo.jpg, consultado em 17 de Junho de 1010.

[39] Disponível em http://www.constructionweekonline.com/pictures/gallery/Gallery/Diver_coral_Nakheel.jpg, consultado em 17 de Junho de 2010.

[40] Disponível em http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n7/fig_tab/ngeo572_F2.html, consultado em 17 de Junho de 2010.

[41] Thoresen, C. A., *Port designer's handbook: recommendations and guidelines*, Thomas Telford, London, 2003.

[42] Disponível em http://www.coastalwiki.org/w/images/b/bb/FBimage006.JPG, consultado em 17 de Junho de 2010.

[43] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 4, Part VI-4-2, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[44] Disponível em http://vhd.heritage.vic.gov.au/vhd/heritagevic#large_image_carousel:23012:0, consultado em 18 de Julho de 2010.

[45] Disponível em http://farm3.static.flickr.com/2179/2062372305_c156df0f0c.jpg, consultado em 16 de Julho de 2010.

[46] Disponível em http://www.asprodicnicaragua.org/ana/AGUA/FOTOS/contaEmisario.jpg, consultado em 18 de Julho de 2010.

[47] Disponível em http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Oil_platform_in_the_North, consultado em 19 de Julho de 2010.

[48] Disponível em http://www.tencate.com/TenCate/Geosynthetics/images/Geo_Asia/ image042.jpg, consultado em 19 de Julho de 2010.

[49] Disponível em http://towndock.net/img/5972.jpg, consultado em 19 de Julho de 2010.

[50] Disponível em http://1.bp.blogspot.com/_eRchI9pdJRw/R8r3lUbHRXI/AAAAAAAAACg/oUQAUFYhwUo/s1600-h/obras5-inag%5B1%5D.jpg, consultado em 19 de Julho de 2010.

[51] Disponível em http://bp0.blogger.com/_PoLxaj_tQwI/RdRaV75H3BI/AAAAAAAAAeA/Rmn5qJd2HeM/s1600-h/07052006%28011%29.jpg, consultado em 19 de Julho de 2010.

[52] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 4, Part VI-4-3, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[53] LNEC/NPE, Modelação da agitação marítima e correntes, disponível em http://www.lnec.pt/organizacao/dha/npe/estudos_id/mamc, consultado em 17 de Junho de 2010.

[54] Disponível em http://sheetpilespiling.com/wp-content/uploads/2009/12/cellular1.jpg, consultado em 16 de Julho de 2010.

[55] Gerwick, B. C., *Construction of marine and offshore structures*, 2ª ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.

[56] WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, *Grande reparação do molhe principal do porto do Porto Santo, Vol. 3* - Projecto de execução, Portela, 2006.

[57] Silva, J. B. P., *Areia de praia da ilha do Porto Santo: geologia, génese, dinâmica e propriedades medicinais*, Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2002.

[58] ETERMAR, Porto Santo – Grande reparação do molhe principal do porto, Disponível em http://www.etermar.pt/download.asp?file=Catalogo/Eng_Costeira/2010/0866-Molhe%20de%20Porto%20Santo%20En.pdf, consultado em 14 de Junho de 2010.

[59] Kay, R. e J. Alder, *Coastal planning and management*, 2ª ed., Taylor & Francis, New York, 2005.

[60] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 5, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[61] Sardinha, A. M., *Ciência e tecnologia dos materiais*, Editora Intelecto, 1988.

[62] Disponível em http://vp.gov-madeira.pt/sdd/galeria/piscinas%20brava%20%281%29.jpg, consultado em 18 de Agosto de 2010.

[63] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 4, Part VI-4-5, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[64] Reeve D., A. Chadwick e C. Fleming, *Coastal engineering: processes, theory and design practice*, Spon Press, New York, 2004.

[65] Migliorini, A. V. e A. C. T. Guimarães, Tipos de blocos de concreto para estrutura hidráulica de proteção às ondas marinhas e análise visual dos tetrápodes da Barra de Rio Grande, in *III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Editora da FURG, Rio Grande, RS, 2008.

[66] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 5, Part VI, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[67] Lin, P., *Numerical modeling of water waves*, Taylor & Francis, New York, 2008.

[68] Kraus, N. C. (Ed.), *History and heritage of coastal engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, 1996.

[69] Macdonel Martínez, G., J. Pindter Vega, L. Herrejón de la Torre, J. Pizá Ortiz e H. López Gutiérrez, *Ingeniería marítima y portuaria*, Alfaomega, Madrid, 1999.

[70] Disponível em http://www.copaboinfra.com.br/index.html, consultado em 18 de Agosto de 2010.

[71] Mason, J., *Obras portuárias*, Campus, Rio de Janeiro, 1982.

[72] Disponível em http://www.floatingfender.com/, consultado em 16 de Julho de 2010.

[73] Navarro Torres, V. F. e C. D. Gama, *Engenharia ambiental subterrânea e aplicações*, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/CYTED, Rio de Janeiro, 2005.

[74] McCormac, J. C., *Structural steel design*, 4ª ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2008.

[75] Nawy, E. G., *Reinforced concrete: a fundamental approach*, 6ª ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2009.

[76] Everard, N. J., *Schaum's outline of theory and problems of reinforced concrete design*, 3ª ed., McGraw-Hill, New York, 1993.

[77] Pilarczyk, K. W. e R. B. Zeidler, *Offshore breakwaters and shore evolution control*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1996.

[78] John, N. W. M., *Geotextiles*, Blackie and Son, Glasgow, 1987.

[79] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, *Shore protection manual*, Vol. III, Chapt. 1, Part I, Books for Business, Toronto, ON, 2002.

[80] Pilarczyk, K. W., *Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2000.

[81] Van der Meer, J. W. e K. W. Pilarczyk, Stability of rubble mound slopes under random wave attack, in *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, Houston, TX, 1984.

[82] McConnell, K., *Revetment systems against wave attack – A design manual*, Thomas Telford, London, 1998.

[83] Pilarczyk, K. W., *Coastal protection*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1990.

[84] Taveira-Pinto, F. e A. C. Neves, A importância da consideração do carácter irregular da agitação marítima no dimensionamento de quebramares de taludes, *Engenharia Civil*, 16: 95-111, 2003.

[85] Rocha, A., J. Silva, H. Soares, J. Abenta, F. Almeida e C. Gomes, Geologia, génese e dinâmica da areia de praia da ilha do Porto Santo: o sistema de informação geográfica, in *Actas do VII Encontro de Utilizadores de Sistemas de Informação Geográfica*, Oeiras, Portugal, Instituto Geográfico Português, Lisboa, 2002.

[86] Lloris, D., D. Rucabado e H. Figueroa, Biogeography of the Macaronesian ichtyofauna (The Azores, Madeira, the Canary Islands, Cape Verde and the African Enclave), *Boletim do Museu Municipal do Funchal*, 43(234), 191-241, 1991.

[87] Galopim de Carvalho, A. M. e J. M. Brandão, *Geologia do arquipélago da Madeira*, Museu Nacional de História Natural, Lisboa, 1991.

[88] Barcelos, M., Porto de abrigo, disponível em http://olhares.aeiou.pt/porto_de_abrigo_foto662895.html, consultado em 14 de Julho de 2011.

[89] Mai, S., N. Ohle e K.-F. Daemrich, Numerical simulation of wave propagation compared to physical modeling, in *Proceedings of the HYDRALAB Workshop on Experimental Research and Synergy Effects with Mathematical Models*, Hannover, Germany, 1999.

[90] Oh, S.-H., K.-D. Suh, S. Y. Son e D. Y. Lee, Performance comparison of spectral wave models based on different governing equations including wave breaking, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(2):75-84, 2009.

[91] Emmanouil, G., G. Galanis, G. Kallos, L. A. Breivik, H. Heiberg e M. Reistad, Assimilation of radar altimeter data in numerical wave models: an impact study in two different wave climate regions, *Annales Geophysicae*, 25: 581-595, 2007.

Anexo A

DIMENSIONAMENTO DA PROTECÇÃO CONTRA A ACÇÃO DAS ONDAS

As camadas de protecção, sejam elas filtros ou enrocamentos, são sempre de considerar quando se pretende escolher uma solução técnica viável, capaz de evitar a erosão ou o galgamento da costa pelas ondas e correntes marítimas.

Os principais tipos de revestimentos e seus modos de rotura encontram-se sumarizados na Tabela A.1.

Devido à comum instabilidade na base das estruturas marítimas, estando o pé dos taludes geralmente apoiado sobre leito de solos arenosos, é comum surgirem escorregamentos ou assentamentos, sendo este um dos pontos mais críticos das estruturas de defesa costeira. Tal situação deve ser prevenida ao máximo, sob pena de colocar em risco o manto e as camadas de protecção.

Contudo, o dimensionamento é executado com o intuito de diminuir ao máximo os carregamentos provocados pela hidrodinâmica nas camadas exteriores da estrutura, garantir a uniformização do peso próprio da estrutura através de uma base de regularização, incorporando ou não uma protecção de pé de talude, bem como acautelar a fuga do material subjacente para camadas superiores, por meio do emprego de filtros entre as diversas camadas [80].

A.1 Dimensionamento das protecções

A.1.1 Dimensionamento do peso do material a usar nos enrocamentos

Devido à imprecisão na disposição dos blocos, que influenciam as forças adjacentes reactivas, bem como à incerteza da dinâmica marítima actuante sobre estes, o dimensionamento nunca será perfeitamente exacto. Desta forma, os métodos de

cálculo são simplificados, assumindo por vezes que a agitação marítima tem um comportamento regular, desprezando assim muitos aspectos físicos, o que os torna limitados, sendo desejável sua conjugação com ensaios em modelos reduzidos, numa abordagem semi-empírica.

Tabela A.1 – Principais tipos de revestimentos e modos de rotura (extraído de [80]).

Tipos de revestimento	Tipos de rotura	Principais cargas devido à agitação	Resistência
Areia/ Gravilha	Movimentação; Transporte de material; Formação do plano de falha	Campo de velocidades	Peso próprio; Atrito; Estabilidade sob acção dinâmica
Argila/ Relva	Erosão; Deformação	Impacto da onda; Velocidade máxima	Coesão; Qualidade da relva; Raízes da relva
Enrocamento	Movimentação inicial; Deformação	Infiltrações; Velocidade máxima	Permeabilidade do mando e filtros; Peso próprio; Atrito;
Gabiões	Movimentação inicial; Oscilações; Degradação de arames; Raios UV; Deformação	Impacto da onda; Velocidade máxima	Permeabilidade; Amarrações; Peso próprio; Maiores unidades;
Blocos	Movimentação; Deformação; Empenamentos	Impacto de onda; Pressões adjacentes	Espessura; Atrito; Permeabilidade; Amarrações
Betuminoso	Levantamentos; Deformação; Erosão; Aceleração; Frequência; Ciclos de carregamento	Impacto de onda; Sobrepressões; Velocidade máxima	Peso próprio; Resistência mecânica

O modelo de cálculo de Hudson [84], expresso pela Equação A.1, é um dos mais conhecidos para a estimativa do peso unitário do material de composição dos mantos resistentes, tendo em conta a altura de onda e a inclinação do talude:

$$W = \frac{H^3 \gamma_S}{\cot g\, \alpha \left(\frac{\gamma_S}{\gamma_w} - 1\right)^3 K_d} \qquad (A.1)$$

onde:

W - peso unitário do material (por exemplo, bloco de betão);

H - altura da onda de projecto;

γ_s - peso volúmico do material dos blocos do manto resistente;

γ_w - peso volúmico da água do mar;

α - ângulo que o talude forma com a horizontal;

K_d - coeficiente de estabilidade, cujo valor é mostrado na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Valores de K_d consoante a forma e a posição dos blocos e o tipo de ondas, com danos máximos de 5% (extraído de [66]).

Danos de 0 a 5%			
Forma dos blocos	Posição dos blocos	Tipos de ondas	
		Com rebentação	Sem rebentação
Arredondada	Aleatória	1,2	2,4
Angular	Aleatória	2	4
	Perpendicular à costa	5,8	7

A.1.2 Dimensionamento do diâmetro do enrocamento considerando uma altura de onda regular

Após ser determinado o peso individual dos elementos que irão compor a camada em questão, segue-se o cálculo do diâmetro do enroncamento, de acordo com a Equação A.2 [84]:

$$D_n = \left(\frac{W}{\gamma_S}\right)^{1/3} \quad \text{(A.2)}$$

onde:

D_n - diâmetro da unidade de protecção;

W – peso do material a utilizar;

γ_s - peso volúmico do material dos blocos do manto resistente.

A.1.3 Dimensionamento do diâmetro do enrocamento considerando a altura da onda irregular

Da necessidade de considerar alguns aspectos no dimensionamento do tamanho das unidades que fazem parte do manto resistente, surgiu um método mais apurado, devido à Van der Meer [84], que pondera a não uniformidade da agitação marítima, a permeabilidade dos filtros e do núcleo, o nível médio da água, os diferentes tipos de rebentação, os danos na estrutura devido ao galgamento, além de outros parâmetros.

Para quebramares não galgáveis, sujeitos a ondas tipo mergulhante ou oscilante, ou de transição entre as duas, compostos por enrocamentos de duas camadas e grandes profundidades ($d > L_0/2$), tem-se, de acordo com [84]:

a) Tipo de rebentação mergulhante/basculante, isto é, verifica-se a condição $\xi_m < \xi_{mc}$ [85],

$$\xi_m = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{S_m^{0,5}} < \xi_{mc} = [6{,}2P^{0,31}(\operatorname{tg}\alpha)^{0,5}]^{\frac{1}{(P+0,5)}} \quad \text{(A.3)}$$

Esta condição sujeita o manto à instabilidade devido à súbita rebentação,

$$\frac{H}{\Delta D_n} = 6{,}2P^{0,18}(SN^{0,5})^{0,2}\xi_m^{-0,5} \quad \text{(A.4)}$$

sendo:

ξ_m – número de Iribarren;

ξ_{mc} – número de Iribarren crítico;

S_m – declividade da onda, $S_m = \frac{H}{L_0}$;

α - ângulo de inclinação do talude com a horizontal;

L_0 - comprimento de onda (em grandes profundidades, $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$);

g - aceleração gravítica;

T - período de onda;

H - altura de onda;

N - número de ondas a partir do qual o equilíbrio é atingido (<7500);

S - nível de estragos, de acordo com a Tabela A.3;

P - factor de permeabilidade, dado pela Figura A.1.

Tabela A.3 – Valores de S a considerar para os níveis de estragos em mantos de duas camadas (extraído de [86]).

Inclinação do talude	Estragos iniciais	Estragos intermédios	Ruína
1:1,5	2	3–5	8
1:2	2	4–6	8
1:3	2	6–9	12
1:4	3	8–12	17
1:6	3	8–12	17

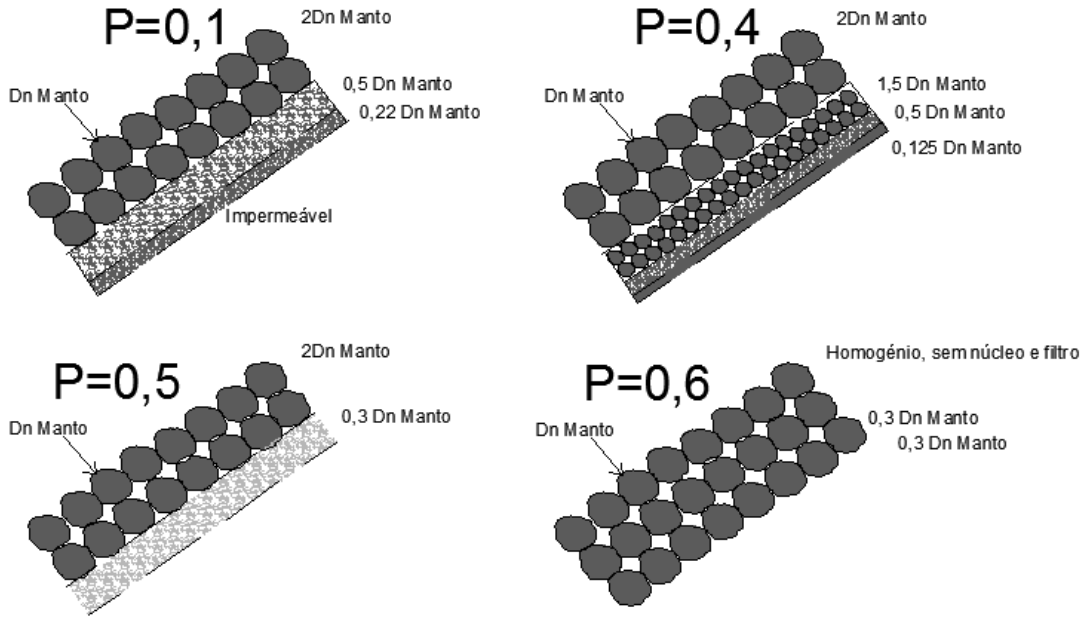

Figura A.1 – Factor de permeabilidade consoante a configuração (adaptado de [86]).

b) Tipo de rebentação oscilatório, isto é, verifica-se a seguinte condição, $\xi_m > \xi_{mc}$ [84],

$$\xi_m = \frac{\mathrm{tg}\,\alpha}{S_m^{0,5}} \quad > \quad \xi_{mc} = [6{,}2P^{0,31}(\mathrm{tg}\,\alpha)^{0,5}]^{\frac{1}{(P+0,5)}} \tag{A.5}$$

Para os casos em que o talude é acentuado e a rebentação acontece muito próxima da costa, tem-se [84]:

$$\frac{H}{\Delta D_n} = P^{-0,13}(SN^{0,5})^{0,2}\sqrt{\cot g\,\alpha}\,\xi_m^P \qquad (A.6)$$

No caso de pequenas profundidades relativas, isto é, $d/L_0 < 1/25$, as equações anteriores são válidas com a alteração de H por $H_{2\%}/1,4$ [85].

No entanto, se for permitido o galgamento da estrutura, o D_n, nas Equações 3.1 e 3.3, deve ser multiplicado por f_i [6],

$$f_i = \frac{1}{1,25-4,8\frac{R_c}{H}\sqrt{\frac{H}{2\pi L_0}}} \qquad (A.7)$$

onde:

$$0 < \frac{R_c}{H}\sqrt{\frac{H}{2\pi L_0}} < 0,052$$

sendo:

H - altura significativa das ondas;
R_C - altura acima do nível de repouso;
L_0 - comprimento de onda;

A.1.4 Dimensionamento do diâmetro dos blocos de betão

Este tipo de dimensionamento foi uma evolução do dimensionamento do enrocamento, considerando a altura de onda irregular, a inclinação do talude e uma permeabilidade constante (cotg α = 1,5) ou o factor P = 0,4.

Assim sendo, para mantos de duas camadas de blocos de betão (cubos) dispostos de forma irregular, tem-se [85]:

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \left(\frac{6,7N_{od}^{0,4}}{N^{0,3}} + 1\right)\left(\frac{H}{L_0}\right)^{-0,1} \qquad (A.8)$$

onde:

H - altura significativa das ondas;
L_0 - comprimento de onda;
N - número de ondas a partir do qual o equilíbrio é atingido (<7500);
N_{od} - quantidade de blocos deslocados do manto, de acordo com a Tabela A.4.

Tabela A.4 – Valores para N_{od} em função do nível de danos na estrutura (extraído de [85]).

Tipos de blocos	Inclinação do talude	Estragos iniciais	Estragos intermédios	Ruína
Cubos	1:1,5	0	-	2
Tetrápodes	1:1,5	0	-	1,5
Acrópodes	1:1,33	0	-	0,5

No caso específico de se pretender utilizar blocos do tipo tetrápode em taludes não galgáveis, será mais adequado utilizar a Equação A.9 [85], isto para taludes com cotg α = 1,5, número de Iribarren na faixa 3,5 < ξ_m < 6 e ondas de grande profundidade, com rebentação do tipo oscilatório.

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \left(\frac{3{,}75 N_{od}^{0,5}}{N^{0,25}} + 0{,}85\right)\left(\frac{H}{L_0}\right)^{-0,2} \tag{A.9}$$

Para pequenas profundidades relativas, poderá ser utilizada a equação anterior com a alteração de H por $H_{2\%}/1{,}4$.

Para o caso de ser prevista uma rebentação do tipo mergulhante, a seguinte equação deverá ser utilizada [84]:

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \left(\frac{8{,}6 N_{od}^{0,5}}{N^{0,25}} + 3{,}94\right)\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0,2} \tag{A.10}$$

A.1.5 Espessura do coroamento

O coroamento deve ser protegido contra os galgamentos, afim de evitar problemas de drenagem na estrutura, acautelar a erosão nas áreas acima do revestimento, prevenindo a destruição da estrutura de cima para baixo.

Como na maior parte das vezes posicionar o coroamento num ponto muito alto é inviável, por questões estéticas, económicas ou outras, a solução pode passar pelo reforço da crista, sendo a espessura desta protecção dada por [83]:

$$\frac{H}{\Delta D_n} = \frac{1{,}5 \cos\alpha}{\phi_T \xi^{2b}\left(1-\frac{R_c}{R_u}\right)} \tag{A.10}$$

onde:

D_n - diâmetro de cada bloco da unidade de protecção;

H - altura significativa da onda;

ξ_P - parâmetro de rebentação;

A - ângulo de inclinação do talude com a horizontal;

L_0 - comprimento de onda;

R_C - altura acima do nível de repouso;

R_U - cota de espraiamento;

φ_T - factor de estabilidade, dado na Tabela A.5;

b - expoente que relaciona a agitação com o tipo de revestimento, de acordo com a Tabela A.6.

Tabela A.5 – Valores de φ_T consoante a disposição do material (extraído de [80]).

	Enrocamento	Blocos colocados	Tapetes de blocos
φ_T	1	0,5	0,4

Tabela A.6 – Valores de b em função do revestimento (extraído de [83]).

	Revestimento	
	Rugoso	Liso
b	0,25	0,5

A.1.6 Comprimento da zona de protecção da crista

O comprimento da zona de protecção da crista é influenciado pela permeabilidade da área de rebentação da onda e está relacionado com a dissipação de energia, sendo dado por [83]:

$$L_S = \frac{\Psi_U}{5} T\sqrt{g(R_u - R_c)} \geq L_{min} \qquad (A.11)$$

onde:

g - aceleração gravítica;

R_C - altura acima do nível de repouso;

R_U - cota de espraiamento;

L_{min} - pelo menos igual à espessura do revestimento, incluindo subcamadas;

T - período de pico;

Ψ_U - coeficiente de majoração, segundo a Tabela A.7.

Tabela A.7 – Parâmetro Ψ_U para diferentes tipos de protecção (extraído de [80]).

Tipo Protecção	Ψ_U	Descrição	Sub camada
Enrocamento	1,00	2 Camadas	Granular
	1,33	Danificação aceitável	Granular
Alvenarias	1,00	Pedras de pouca qualidade (Irregulares)	Granular
	1,33	Pedras de qualidade (Irregulares)	Granular
	1,50	Pedras naturais	Granular
Blocos; Colchões de blocos	1,50	Blocos livres apertados/ H_S<1,5 m	Geotêxtil sobre solo granular
	1,50	Blocos livres apertados	
	1,50	Blocos ligados ao geotêxtil	Granular
	2,00	Blocos livres apertados	Geotêxtil sobre solo fino
	2,00	Blocos armados/Blocos abertos (>10%)	
	>2,5	Blocos ligados/ elevado embricamento	Granular
Betão	1,05	Superfície lisa (30% vazios)	
	1,50	Superfície rugosa (60% vazios)	
Betuminoso	2,00	Pedras abertas e betuminoso (U_p≤6 m/s)	Geotêxtil sobre solo fino e asfalto
	2,50	Pedras abertas e betuminoso (H_s≤4 m)	
Gabiões	2 a 3	Gabiões/colchões (H_s≤1,5 m)	Geotêxtil sobre solo areia ou argila
	2 - 2,5	Enchimento com pedras (1,8 D_n)	
Geocontentores	1,00	P_n<<1 menos permeável que o colchão	Solo fino ou possivelmente, geotextil
	1,50	P_n=1	
	2,00	P_n>>1	

P_n - razão entre as permeabilidades da camada e subcamada

U_p - velocidade permitida

A.2 Critério de estabilidade das estruturas

Os ataques provocados pelas ondas, pelas correntes e pela passagem de embarcações são factores que influenciam a estabilidade das estruturas. Assim sendo, o critério de estabilidade para revestimentos sujeitos à agitação, em modelos de grande escala, é dado por [81]:

$$\frac{H}{\Delta D} \leq \psi_u \phi_T \frac{\cos \alpha}{\xi_p{}^b}, \text{cotgh}\, \alpha \geq 2 \qquad \text{(A.12)}$$

onde:

H - Altura significativa das ondas;

α - ângulo de inclinação do talude com a horizontal;

b - expoente que relaciona a agitação com o tipo de revestimento, segundo a Tabela A.8;

ϕ_T - factor de estabilidade, obtido da Tabela A.5;

Δ - densidade relativa do sistema de protecção, de acordo com a Tabela A.9;

D - espessura da protecção, também obtida da Tabela A.9;

Ψ_U - coeficiente de majoração, de acordo com a Tabela A.7;

ξ_p - parâmetro de rebentação, dado por:

$$\xi_p = \text{tg}\, \alpha \frac{H_s}{L_0}^{-0,5} = 1{,}25 T_p H^{-0,5} \text{tg}\, \alpha \qquad \text{(A.13)}$$

onde:

L_0 - comprimento de onda;

T_P - Período de pico.

As expressões anteriores são fiáveis para valores de $\xi_p \leq 3$, sendo que para valores superiores adopta-se $\xi_p = 3$.

Tabela A.8 – Valores de *b* tendo em consideração o tipo de revestimento (extraído de [82]).

	Revestimento		
	Rugoso/Permeável	Outros	Liso/Pouco permeável
b	0,5	2/3	1

Tabela A.9 – Valores a atribuir a Δ e *D* de acordo com o tipo de sistema (extraído de [80]).

Tipo de Sistema	Blocos	Enrocamento	Colchões
Δ	$\frac{\gamma_S-\gamma_w}{\gamma_w}$		$(1-n)\frac{\gamma_S-\gamma_w}{\gamma_w}$
D	Espessura dos blocos	$\left(\frac{M}{\gamma_S}\right)^{1/3}$	Espessura média do colchão

n – porosidade do material de enchimento;

γ_s – Peso volúmico do material dos blocos do manto resistente;

γ_w – Peso volúmico da água do mar.

O valor de *D* dos blocos será considerado igual ao comprimento das arestas no caso de cubos e de blocos antifer, corresponde a $0.65D_i$ no caso dos tetrápodes, a $0.7D_i$ para os acrópodes e a $0.54Di$ no caso dos dolos, sendo D_i a altura do bloco [84].

Além da estabilidade da protecção, manter em boas condições o pé do talude é primordial, evitando que este seja descalçado, visto ser nesta zona que se verificam vulgarmente as roturas, podendo ser adoptadas algumas das configurações apresentadas na Figura A.2.

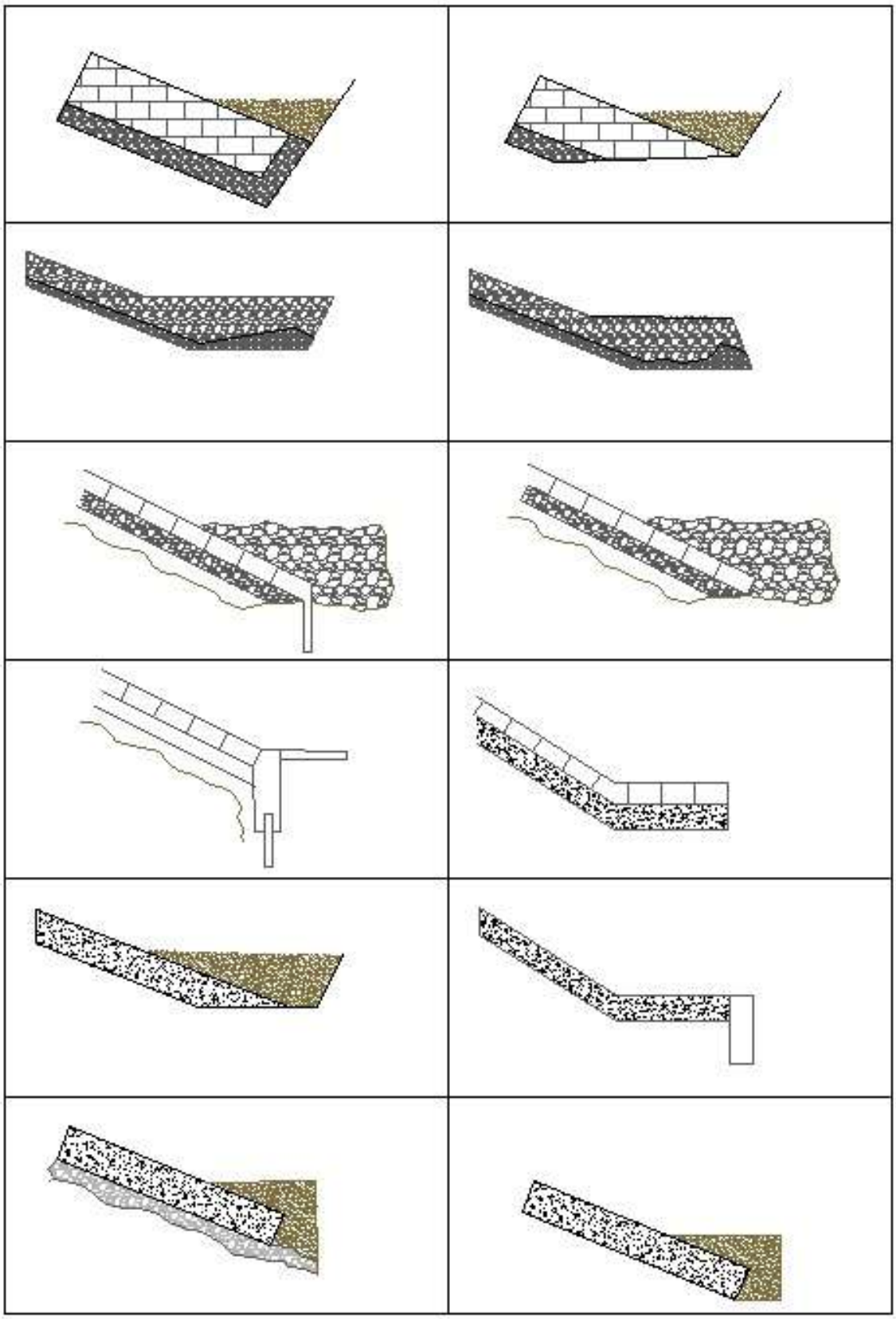

Figura A.2 – Diferentes configurações para o pé de talude (adaptado de [82]).

Anexo B

MATERIAIS USUALMENTE UTILIZADOS EM OBRAS MARÍTIMAS

Todos os projectos de engenharia para serem bem sucedidos dependem, logicamente, dos cálculos efectuados — tendo em conta as acções e características locais —, dos métodos construtivos e, sobretudo, dos materiais a aplicar.

O sucesso das obras marítimas e costeiras depende, igualmente, dos materiais nelas empregues, uma vez que destes se espera um desempenho afirmativo ao longo do tempo, de forma a conseguir manter tanto quanto possível inalterada a funcionalidade da estrutura.

Para um projectista de obras marítimas e costeiras, é assim imperativo conhecer detalhadamente os diferentes materiais e as suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, uma vez que os materiais poderão estar temporaria ou constantemente em contacto com distintos agentes, sendo portanto essencial saber até que ponto um determinado material se adequa a uma funcionalidade e durante que espaço de tempo consegue manter as suas características.

A adaptabilidade será sempre uma característica preponderante na escolha dos materiais a utilizar, pois, por exemplo, um determinado material pode possuir um desempenho muito bom a uma dada temperatura, mas, com a variação desta, pode não se conseguir adaptar-se e acabar por adquirir propriedades indesejadas. Outra preocupação a ter em conta é a adequada conjunção de distintos materiais.

Factores económicos podem influenciar na escolha de um material, sendo comum a opção por materiais que não se localizem muito distantes da obra e que não sejam de difícil acesso, situações estas que poderiam se traduzir num custo acrescido.

Outros aspectos importantes na escolha de um material são a disponibilidade de mão-de-obra qualificada para aplicá-lo, a reduzida exigência de manutenção e, sobretudo, que o mesmo não seja agressivo ao meio ambiente.

Os materiais usualmente mais utilizados em obras costeiras e marítimas incluem os betumes, os metais, os agregados, as madeiras e os polímeros.

B.1 Principais características dos materiais

— *Densidade específica*: É o quociente entre a sua massa volúmica de um material e a massa volúmica de referência, que é a da água a 4°C.

Esta é uma característica muito interessante e pode ser aplicada para diferentes finalidades, uma vez que, na engenharia costeira e marítima, tanto os materiais mais densos como os menos densos têm interesse e aplicações distintas. Materiais como o betão e as pedras, por possuírem elevadas densidades em comparação com a da água, são os mais indicados para a construção de diferentes tipos de estruturas, como quebra-mares, estruturas de acortagem, barreiras e pilares [1].

— *Resistência*: A resistência às forças aplicadas é uma característica inerente a cada material, o que leva a que os mesmos sejam escolhidos de forma a poderem resistir aos esforços que se prevêem serem aplicados, sendo que nas obras costeiras podem ocorrer esforços axiais de compressão e tracção, flexão e torção.

É difícil encontrar um material perfeito, que seja plenamente eficaz quando sujeito aos esforços antes referidos. Por exemplo, o aço é um material isotrópico e possui características que o capacitam a resistir a estes esforços, porém, quando sujeito a diferenças de temperatura, pode passar de um material dúctil a um material frágil.

Por outro lado, materiais como o betão, o asfalto, a terra e a pedra resistem muito pouco à tracção, porém conseguem resistir a esforços de compressão, de corte e a impactos de forma mais satisfatória.

O betão conjugado com o aço — betão armado e pré-esforçado — torna-se um material mais equilibrado, com melhores faculdades de resistir à tracção e à compressão.

Perfis em madeira, apesar de ser este um material que, ao contrário dos metais, não é isotrópico e, portanto, cujo desempenho depende da forma como estão dispostos os seus veios, apresentam diferente capacidade de resistência à tracção e à compressão.

Outro tipo de material também utilizado em obras costeiras são os polímeros, que, dependendo do seu perfil, poderão ser um material com comportamento elástico ou plástico, facilmente influenciável a nível de resistência pelas variações de temperatura.

— *Compatibilidade*: Não sendo possível dispor de um material perfeito, é comum conjugar distintos materiais nas construções com o intuito de tirar proveito da complementaridade destes, sendo o exemplo mais comum o betão armado, em que o betão, além de proteger o aço, confere maior capacidade de resistência à tracção.

Se por um lado estas combinações conseguem soluções que à primeira vista são interessantes, ao fazerem com que distintos materiais se complementem, não é menos verdade que, com o tempo, tais combinações podem acabar por ser a causa de problemas decorrentes de incompatibilidades de natureza física ou química. Por exemplo, relativamente às propriedades físicas, materiais com diferentes coeficientes de dilatação ou com diferentes módulos de elasticidade ou de distorção, quando submetidos a temperaturas extremas, terão reacções diferentes, que acabarão por dar origem a tensões na estrutura. As reacções físico-químicas decorrentes da combinação de distintos metais são outro exemplo de possíveis incompatibilidades, uma vez que diferentes metais em ambientes gelados contraem-se de forma distinta e, quando em contacto com ambientes marinhos, apresentam distintos níveis de oxidação.

— *Fadiga*: Quanto à fadiga decorrente de impactos e de cargas sísmicas, os materiais aplicados em obras marítimas e costeiras devem apresentar boa capacidade de resistência ao choque, devendo ser tais estruturas projectadas para absorver, sem deformação, os embates cíclicos das ondas e os pequenos impactos provocados por embarcações, bem como, em alguns casos, as acções sísmicas sobre elas actuantes.

— *Ductilidade*: Diz-se que um material é dúctil quando este não é frágil, isto é, quando consegue recuperar a posição inicial sem se partir quando submetido a esforços que tentam a dobrá-lo. Existem materiais com maior flexibilidade, como é o caso dos plásticos, da borracha, da madeira e do aço, e outros menos flexíveis, como, por exemplo, o betão e as rochas.

— *Durabilidade*: A durabilidade de um material é dada pelo tempo que este subsiste numa obra, mantendo-se aceitável na função para a qual foi dimensionado, ainda que se apresente fragmentado, situação esta comum em obras marítimas e costeiras devido aos impactos das ondas e de embarcações, às reacções químicas, aos ciclos de grandes variações de temperatura, sobretudo nos casos de elevadas mais temperaturas, e aos ciclos de congelamento e descongelamento observados nas regiões de latitudes mais elevadas.

— *Custo*: Um dos grandes objectivos nas obras de engenharia é conseguir que os custos se mantenham baixos e que as soluções adoptadas sejam funcionais. Assim, como os materiais têm um enorme peso no orçamento, é imperativo arranjar soluções financeiramente vantajosas tanto para o presente, quanto para o futuro, a nível de manutenção.

— *Adaptabilidade*: Esta é uma característica exibida por alguns materiais, que permite moldá-los em diferentes tamanhos, formas ou texturas para a sua adequada aplicação.

— *Disponibilidade*: A disponibilidade dos materiais na região onde será implementada a obra costeira é muito importante, uma vez que a sua inexistência

poderá condicionar o projecto tanto no seu início quanto no futuro, no caso de necessidade de manutenção.

Este parâmetro poderá influenciar os prazos da obra e aumentar os custos de construção, sendo uma solução inteligente, nos casos em que o material não é abundante, armazenar o material necessário para a obra durante a fase de execução de outras actividades, bem como material adicional, de forma a assegurar a sua disponibilidade no futuro, no caso de necessidade de manutenção ou de modificação estrutural.

— *Manutenção*: A manutenção será tanto mais periódica quanto menos cuidada tenha sido a selecção dos materiais, isto é, a manutenção acontece mais regularmente quando os materiais não são convenientemente escolhidos, tendo em conta as acções a que serão submetidos.

— *Manuseamento*: O manuseamento dos materiais é parte significativa do orçamento, visto que estes devem ser manipulados por mão-de-obra qualificada e, em alguns casos, dependendo das suas características, com auxílio de maquinaria.

— *Impacte ambiental*: Idealmente, este deve ser nulo, devendo as obras primar pela não agressão ao ambiente, principalmente as obras costeiras, que estão por várias formas ligadas à natureza. A persecução deste objectivo começa, desde logo, pela escolha acertada dos materiais, de modo a assegurar que estes, quando submetidos aos diferentes factores envolvidos, não provoquem qualquer impacte sobre o ambiente. Aquando da construção, devem ser tomadas todas as precauções para que a vida marinha na zona não seja afectada e, se possível, criadas novas condições para que os organismos marinhos estranhem o mínimo possível a implantação do projecto, podendo a reparação e manutenção ser também um momento oportuno para a minimização de algum impacte ambiental provocado pela estrutura costeira [73].

— *Porosidade e absorção de água*: São parâmetros importantes no caso das rochas, sendo a primeira definida pela relação entre o volume da rocha e a percentagem de

espaços vazios que a caracteriza. A capacidade de absorção de água é dada pela quantidade de água que uma pedra seca à pressão atmosférica consegue absorver por unidade de massa [73].

— *Retractilidade*: É uma propriedade existente nas madeiras e em outros materiais, que perante a existência de água ou a inexistência desta, faz com que estes materiais inchem ou desinchem, respectivamente, alterando assim as suas dimensões [61].

B.2 Principais materiais utilizados em obras marítimas

B.2.1 Rochas

B.2.1.1 Especificidades

As rochas são dos elementos naturais com maior longevidade existentes. No entanto, de entre as três grandes classes — rochas sedimentares, rochas metamórficas e rochas magmáticas — é necessário escolher o tipo de rocha mais indicada a utilizar, sendo que em cada classe existem variados tipos, com diferentes características de dureza (ver Tabela B.1), estratificação, clivagem, etc.

Deve evitar-se escolher rochas porosas, fissuradas ou com capacidade de absorção de água, nomeadamente no caso da obra se localizar em zonas que possam atingir temperaturas negativas, pois, devido ao fenómeno de crioclastia, a água contida pela rocha, ao congelar, aumenta de volume e exerce pressão nas paredes, levando ao seu fracturamento [3].

Para os casos em que a densidade específica do material não é muito grande, normalmente a solução para o emprego das rochas passa por serem estas colocadas no núcleo da estrutura ou serem utilizados ligantes para que estas não se desloquem da sua posição inicial quando submetidas a impactos. No caso oposto, quando as rochas apresentam uma grande densidade específica, estas são

utilizadas nas camadas frontais das estruturas, visto conseguirem permanecer imóveis quando impactadas. Consoante o tipo de estrutura a que se destinam, este último tipo de rocha, pelo seu enorme peso, propicia grande atrito, podendo dispensar a aplicação de outros materiais ligantes, como o asfalto ou o betão.

É comum o projectista dimensionar frentes de pedras com declives ou irregularidades, objectivando com isto contribuir para a dissipação da energia das ondas, evitando que estas sejam reflectidas ou, ainda, indicar configurações que permitam encaixar umas sobre as outras, evitando a aplicação material de ligação.

No caso das obras costeiras, é pertinente existirem superfícies de escape, isto é, superfícies que permitam a libertação das pressões hidrostáticas, evitando que estas sejam aplicadas à estrutura, devendo tais superfícies livres ser estudadas no caso de estruturas impermeáveis.

Para além das características intrínsecas das rochas, algum tratamento que sofram e o modo como são extraídas — corte ou meios explosivos— também irão influenciar na sua durabilidade [52].

Tabela B.1 – Durabilidade decrescente das rochas (adaptado de [52]).

Rochas com maior durabilidade
Granito
Quartzo
Basalto
Calcário e Dolomite
Riolito e Dacito
Andesito
Arenito
Conglomerados

B.2.1.2 Gradação e aplicações de rochas em obras costeiras

Hoje em dia, as pedreiras possuem maquinaria capaz de extrair e apropriar as rochas às dimensões requeridas em projecto, sendo as mesmas seleccionadas pelo diâmetro em intervalos de tamanhos diversos, que vão desde os pequenos calhaus aos enormes e pesadíssimos pedregulhos. As pedras angulares são geralmente provenientes de extracção, enquanto que as pedras arredondadas são usualmente pedras desagregadas existentes na natureza, que foram desgastadas por diversos fenómenos, ou pedras reutilizadas, vindas de outras obras, que foram sujeitas a desgastes.

São categorizadas e aplicadas da seguinte forma:

— *Pedras armadas* (*armour stones*): Usualmente estes blocos apresentam formas com tamanhos uniformes, sendo rochas pesadas, com elevadas densidades específicas. Na sua colocação em encostas, devido à acção gravítica, as maiores rochas devem ser dispostas, desde a base, com a orientação do eixo maior perpendicular ao declive, subindo gradualmente, de modo a dar origem a uma muralha o mais impermeável possível, não sendo aconselhável que o maior lado seja superior ao menor a triplicar. Este método é tanto mais eficaz quanto maior a experiência e melhor equipamento do manobrador, devendo as rochas ser assentadas em subcamadas, para evitar deslocamentos provocados pela sua colocação ou pela acção das ondas. Existem quatro métodos de colocação das rochas para formar uma camada armada, nomeadamente, aleatório, uniforme, selectivo e especial [52]:

a) *Aleatório*: Trata-se da colocação de pedras desde o pé do talude até ao topo, tendo a camada uma espessura de, pelo menos, duas rochas angulares — não necessariamente de tamanhos iguais, como mostrado na Figura B.2 —, conseguindo bloqueios e a obtenção de uma certa estabilidade, que permita que as rochas mantenham-se nas posições predefinidas mesmo quando submetidas à acção de fortes ondas e correntes.

É importante que o manobrador da grua seja experiente e capaz de colocar as pedras cuidadosamente e o mais próximo possível do local indicado, sem que sejam precisos arrastamentos, conseguindo desta forma uma colocação adequada das rochas, arranjando-as de forma a que as mais pequenas preencham os vazios deixados pelas grandes e que o aspecto final seja preciso na inclinação estipulada [52].

Figura B.2 – Formação aleatória (extraído de [49]).

b) *Uniforme*: Tal como o nome indica, trata-se de um método de colocação de pedras de formas idênticas que são dispostas numa configuração ordenada, como mostrado na Figura B.3, o que só por aí indica que há menos probabilidade das rochas saírem da sua posição quando sujeitas a acções [52]. Devido ao facto das rochas terem tamanhos idênticos, o que pressupõe maiores encargos com pedreiras, e do manobrador do guindaste necessitar de mais tempo para colocá-las em camadas uniformes, este método de posicionamento poderá encarecer a obra, sendo utilizado nomeadamente quando se pretende uma estrutura pouco permeável.

Figura B.3 – Formação uniforme (extraído de [50]).

c) *Selectivo*: Trata-se de um método mais difícil de executar do que de projectar, isto porque tem como objectivo a colocação cuidadosa das rochas seleccionadas, como ilustrado na Figura B.4, de modo a propiciar um atrito mecânico que aumente a estabilidade da estrutura, apesar desta nem sempre ser conseguida na sua totalidade, tornando assim o método bastaste complexo [52].

Figura B.4 – Formação selectiva (extraído de [51]).

d) *Especial*: É um tipo de estrutura constituída por blocos uniformes tipo paralelepípedos que delineiam o perfil, como mostrado na Figura B.5, tratando-se de um método dispendioso devido aos custos de pedreira e à complexidade do posicionamento dos blocos, sobretudo abaixo do nível da água, não sendo assim racional aplicar este método em águas turvas, devido à dificuldade de assentar as pedras com precisão.

   Consoante a obra em questão, o manobrador pode necessitar de orientação para implantar a estrutura no local exacto, podendo esta ajuda ser dada por um GPS acoplado ao guindaste, capaz de posicionar os paralelepípedos na diagonal, formando camadas de baixo para cima, sempre na sua direcção, com pelo menos três lados das rochas em contacto com as adjacentes. Estas rochas, sobretudo em estruturas de uma única camada, não devem sair do perfil da estrutura mais do que um quinto do maior comprimento.

   É aconselhável ter especial cuidado com o nível de água, devido aos danos provocados pelas ondas, sendo, portanto, indicado que a barlavento a estrutura apresente uma altura superior de rochas todas juntas, em comparação com a parte a sotavento, que pode apresentar uma altura menor.

   A estabilidade de uma estrutura deste tipo é sempre incerta, pois depende muito dos cuidados e da precisão com que a obra foi executada pelo manobrador [4].

— *Subcamadas de pedras* (*underlayer stones*): São constituídas por rochas de dimensões inferiores às anteriores, mas apresentam ainda assim dimensões consideráveis, consoante o objectivo. São aplicadas como subcamadas, com no máximo 60 cm de altura, de forma a não permitir a passagem de material pelos espaços vazios. As rochas, ao serem aplicadas, podem ser depositadas sobre o material adjacente, porém de forma cuidadosa, de modo a evitar a sua desagregação [52].

Figura B.5 – Formação especial (extraído de [52]).

— *Enrocamentos*: Consistem no depósito uniforme de rochas irregulares e densas, de variados tamanhos e formas, tendo objectivos semelhantes aos do método das pedras armadas, isto é, funcionam como barreira protectora contra ondas não muito fortes, devendo ser feita uma única camada por cada operação, e não ser a sua execução feita em várias fases, de modo a permitir a criação de camadas uniformes.

Este método poderá ser vantajoso, uma vez que são evitados os custos excessivos decorrentes da necessitade de precisão na colocação das rochas e são dissociados os custos com o seu manuseamento a fim de deixá-las com formas idênticas, sendo, no entanto, necessário ter cuidados na depositação do enroncamento, nomeadamente se existirem mantas geotêxteis que possam romper-se, comprometendo desta forma a função para a qual são destinadas. Além disto, se a altura a partir da qual as rochas são depositadas for excessiva, poderá haver quebras em função do choque de umas rochas contra as outras ou, ainda, estas não ficarem no local pretendido. Os ajustes feitos em rochas já colocadas também podem acarretar o mesmo problema [52].

— *Camadas de retenção*: São constituídas por pedras de pequenas dimensões, dispostas em camadas com o intuito de filtrar [52], tapando assim os vazios e evitando a perda de solos do núcleo.

— *Detritos de pedreiras*: São rochas que não são aproveitadas nas pedreiras. Muitas vezes, são rochas que quebraram, são escombros ou são muito porosas, apresentando tamanhos e formas desenquadradas, tendo por finalidade compor os núcleos de molhes, diques e taludes, constituir protecções provisórias de obras, além de outras aplicações. No caso de material para compor o núcleo, este pode ser depositado — a uma distância inferior a 60 cm acima do fundo do mar [52] — de diversas formas, incluindo barcos de descarga, reboques ou, ainda, com a ajuda de garras.

B.2.2 Terra e areia

B.2.2.1 Especificidades

Os solos usualmente são dos materiais mais heterogéneos, o que implica maiores cuidados quando utilizados nas obras, sendo, portanto, essencial conhecê-los e saber que propriedades possuem, por meio da realização de ensaios de caracterização aos solos para saber, entre outros parâmetros, a capacidade de corte e a sua granulometria, a fim de poderem ser aplicados nos locais certos, a percentagem de vazios, para saber, por exemplo, quantas vezes o cilindro compactador terá de passar, a capacidade de percolação do solo, para ver se o mesmo é indicado para zonas destinadas à impermeabilidade, a sua coesão, para saber que inclinação poderá ter um talude, e o ângulo de atrito, para o correcto dimensionamento, por exemplo, de um muro de suporte.

Os solos são uma mistura de diversos componentes, podendo apresentar percentagens distintas de areias e argilas, cascalhos, lodo, matéria orgânica e matéria vegetal, sendo que os solos possuidores de matéria orgânica não são indicados, uma vez que têm pouca resistência ao corte e são solos muito compressíveis.

Como é óbvio, os solos contaminados não podem ser usados em obras costeiras, de modo a evitar a contaminação da água e dos solos adjacentes, bem como dos animais.

A terra é um material que, quando em contacto com chuvas, gelo, correntes marítimas, animais, actividades humanas ou agentes químicos, pode sofrer alterações, modificando-se o tamanho dos grãos e as suas características devido à erosão, o que a torna menos durável e menos resistente às cargas que possam ser a ela aplicadas.

Menos durável poderá ser também a areia com altos índices de carbonatação, quando sujeita a ataques químicos, sendo a areia proveniente de quartzo a mais resistente.

Em relação à disponibilidade destes materiais para as construções, a areia é geralmente menos disponível, ao contrário da terra, exceptuando os casos em que as argilas ou os lodos podem ser aplicados como material constituinte dos núcleos das estruturas.

No caso de obras que disponham de areias ou terras desprotegidas, devido aos custos elevados de manutenção, devem ser tomadas medidas para sua protecção, de modo a evitar que sejam transportadas do local pela acção dos ventos e das águas.

O manuseamento deste tipo de material é substancialmente fácil, sendo tanto a terra quanto a areia, pelas suas características, usualmente compactadas, ficando esta função dependente do tipo de cilindro compactador. O transporte faz-se por camião ou, no caso de extraída do mar, por bombeamento ou por barco, significando custos acrescidos em decorrência do processo de dragagem.

B.2.2.2 Aplicações de terra e areia em obras costeiras

A terra e a areia são materiais muito importantes nas obras costeiras, por serem economicamente mais atractivos do que outros e desempenharem funções

idênticas de forma igualmente satisfatória. A aplicação destes materiais, para além da vertente económica, raramente causa impactes ambientais e estes geralmente têm um manuseamento fácil, uma vez que os equipamentos que os movimentam são vulgarmente utilizados em obras costeiras, como é o caso das escavadoras, dos camiões, das pás carregadoras e dos compactadores.

É bastante comum encontrar fontes destes materiais perto das zonas de implementação das obras costeiras e, portanto, estes são aproveitados tanto para situações temporárias quanto para situações permanentes das obras, sendo igualmente empregues em conjunção com outros materiais, visto serem componentes de grande expressão para a fabricação de betão, muito utilizado em obras costeiras.

Areia e terra são usadas principalmente em [43]:

a) Paredes verticais e quebra-mares de parede vertical, sendo por vezes utilizado betão pobre para nivelar e dar uma certa consistência ou impermeabilizar mais o solo, o que pode encarecer a obra, porém a utilização de areia ou terra, quando se pretende uma zona drenagem, poderá ser uma solução viável.

b) Diques, que são muitas vezes construídos com material dragado constituído por areias, terras ou argilas. As argilas têm a capacidade de estabilidade, devido às forças de atracção entre as partículas e, portanto, quando utilizadas, são colocadas na parte interior, muitas vezes protegidas por cascalho, que é utilizado como revestimento por ser mais estável contra a erosão devido ao seu tamanho.

c) Enchimento de praia e restauração de dunas, usualmente feito com areia extraída do mar, podendo tal restauração ser executada por meio de depositação ou colocação hidráulica. A colocação por depositação é antecedida pela recolha do material, podendo ser esta feita quer por dragagem ao mar, rios ou lagos ou por escavação em fontes terrestres,

sendo o material extraído transportado e depositado no local pretendido com a utilização dos meios disponíveis, usualmente camiões, escavadoras, barcos e pás carregadoras. No caso da colocação hidráulica, tal como na colocação por depositação, a areia ou a terra é dragada ou escavada, mas o seu transporte acontece hidraulicamente, isto é, o material, com a aparência de pasta fluida, é impulsionado e transportado através de tubulações, sendo usual, no caso de enchimento de praias, as tubulações estenderem-se desde o local da fonte de material até ao sítio de projecto, oferecendo assim maior exactidão na sua colocação.

d) Zonas de acessibilidade, que são zonas criadas nas obras costeiras para a passagem de camiões e a colocação de gruas ou de outros equipamentos pesados que exerçam grandes tensões no solo. São estruturas situadas acima do nível da água e constituídas por terra, areia ou cascalho, podendo ser provisórias ou permanentes.

B.2.3 Metais

B.2.3.1 Especificidades

Os metais, como material usualmente utilizado na construção civil, podem ser ponderados devido às suas características muito particulares, ainda mais quando aplicados nas obras marítimas e costeiras. A maior preocupação dos projectistas prende-se com a durabilidade dos metais, os revestimentos ou tratamentos a que serão sujeitos e os custos que terão, visto estarem constantemente expostos à água salgada. Os metais são materiais isotrópicos, projectados para apresentar comportamentos dúcteis, embora, no caso de existência de fendas, seu comportamento possa ser o inverso, isto é, frágil. A disponibilidade para aquisição de aços correntes é vasta, podendo estes ser adquiridos nos tamanhos standard ou, em alguns casos, com as medidas e formas indicadas pelo projectista, de modo a evitar desperdícios de material ou a necessidade de ligações em obra.

Em obra, os equipamentos para manusear o aço são os comuns, podendo, no entanto, serem precisas adaptações ou outros equipamentos de movimentação no caso de peças muito pesadas.

Sendo o aço o metal mais utilizado nas obras marítimas e costeiras e o que maior apetência tem para se oxidar, implica, desde logo, um custo adicional para evitar que tal aconteça. Para evitar a corrosão dos metais, decorrente da presença do oxigénio atmosférico ou marítimo e das partículas de areia que o vento ou o mar transportam, existem várias formas de protecção, nomeadamente o revestimento não metálico e o metálico.

A pintura é o método mais tradicional de protecção, implicando um custo bastante significativo tanto na obra quanto na manutenção, conforme a exposição a que o material estiver sujeito, sendo a projecção de matérias plásticas fundidas um método de revestimento não metálico menos usual.

Os revestimentos metálicos são basicamente três: a galvanização, que consiste na formação de uma camada protectora de zinco, a electrozincagem, que é realizada pela criação de uma camada também de zinco por meio da electrólise e, finalmente, a metalização em conjunto com um primário, sendo este o método mais utilizado, consistindo basicamente no arremesso de partículas de zinco sobre o metal a proteger.

O aço inoxidável poderia ser uma solução estruturalmente viável, não sendo, porém, economicamente realizável.

No caso das estruturas de aço aplicadas nas obras costeiras não serem protegidas, a sua durabilidade será muito menor e a ferrugem poderá por em causa a sua segurança, visto que o aço irá perder as suas capacidades resistentes. Além disto, o projectista tem que ter em atenção as temperaturas a que a estrutura estará sujeita, devido aos esforços que esta poderá acarretar, colocando a estrutura em risco devido às reacções de contracção e expansão.

As estruturas metálicas poderão ser uma boa solução a aplicar em zonas sísmicas, pois, quando bem projectadas, apresentam boa ductilidade e comportamento elástico, o que significa uma resposta sem danos às acelerações provadas.

O alumínio é um metal dúctil e altamente resistente à corrosão provocada pelo ambiente marítimo, mas que não apresenta grande capacidade de resistência a cargas. Desta forma, tem outras utilidades, sendo geralmente misturado com outros metais que o complementam.

O cobre, material conhecido pela boa condutividade eléctrica, também tem muita utilidade, pois, tal como o alumínio, apresenta resistência à corrosão e sua mistura com outros metais também melhora o seu comportamento [6, 63, 74].

B.2.3.2 Aplicação do aço em obras marítimas e costeiras

Os metais são um tipo de material utilizado nas obras marítimas e costeiras, podendo ser utilizados isoladamente com funções estruturais, como meio de ligação ou, ainda, no caso do aço, em simultâneo com o betão, formando o betão armado.

Este é implementado em muros de betão armado, ensecadeiras, contenções, pré-esforço, pavimentações, postos de amarração e ancoradouros, podendo ser ainda aplicado, por exemplo, em arame para muros de gabiões, portas e barreiras contra marés de tempestade.
É comum o projectista escolher estacas de aço com o objectivo de formar um tipo de barreira denominada estacas-prancha moldadas, criando zonas secas de trabalho, podendo estas ser provisórias ou permanentes e revestidas por betão. Perfis metálicos em H, em I e tubos são usualmente empregues para estabilizar as fundações das estruturas.

A maior parte dos perfis metálicos apresenta comprimentos na ordem dos 15 m e, no caso de chapas, estas não ultrapassam os 2,5 m x 8 m, o que implica que terão de ser feitas ligações na obra para juntar as peças caso o projectista pretenda uma

estrutura com dimensões superiores às medidas padrão ou, ainda, quando existirem limitações no transporte dessas peças, devido à reduzida capacidade dos meios disponíveis ou por exigências legislativas. As ligações mais frequentes são as aparafusadas — ligação corrente e ligação pré-esforçada —, as soldadas — cordões de topo e cordões de ângulo —, os rebites e os rebites de anel. Os rebites são uma solução interessante para unir metais distintos, pois requerem menos habilidade e, ao contrário da soldadura, não altera as características dos metais na zona de junção, permitindo, caso seja necessário, a remoção de peças metálicas de forma mais fácil do que no caso do emprego de soldadura. Nas situações mais críticas, é usual realizar-se inspecções às soldaduras com auxílio de equipamento de raios-X [5, 63].

B.2.4 Betão

B.2.4.1 Especificidades

O betão é o betuminoso mais utilizado nas obras costeiras, apresentando características importantes que o tornam uma escolha sempre a considerar, podendo, além disto, ser complementado com outros materiais. É um material que apresenta um peso específico variando entre os 22 kN/m^3 e os 26 kN/m^3, em função dos tipos e das quantidades dos materiais utilizados.

O betão é formado pela junção de diversos materiais, em variadíssimas porções, conforme a utilidade que se pretende, sendo genericamente uma junção de inertes de diferentes granulometrias, usualmente brita e areia, que representam até 80% da dosagem, ligante hidráulico — sendo o mais comum o cimento Portland—, água e, eventualmente, adjuvantes ou outros aditivos, que podem representar até 8% da dosagem. O cimento é o mais caro de todos os componentes, devido ao elevado consumo de energia exigido na sua produção, sendo que os restantes compostos existem, na sua maioria, em larga escala, estando portanto disponíveis a preços inferiores, o que torna o betão um material de construção muito viável.
A quantidade de água e de inertes, bem como os seus tamanhos, influenciam nas características do betão, as quais devem ser definidas pelo projectista e conferidas

através de ensaios a provetes e também na obra, a fim de conferir a resistência pretendida.

A escolha de um tipo de betão pode ser condicionada pelo tipo de ambiente a que este estará exposto, bem como pela impermeabilidade, compacidade e durabilidade pretendidas e pelos meios de transporte e de aplicação disponíveis na obra, entre outros factores. No caso de se tratar de betão armado, não será conveniente utilizar água salgada na mistura, devendo os inertes, caso extraídos do mar, ser convenientemente lavados. Além das misturas com água salgada serem prejudiciais para os elementos estruturais constituídos por aço, o betão com ela produzido também apresenta menor resistência quando comparado com misturas feitas com água doce, limpa e sem produtos químicos.

Em relação aos inertes, para uma boa performance do betão, impõe-se que estes sejam rígidos e com baixa porosidade, devendo apresentar granulometrias inferiores em 5 mm aos espaçamentos da armadura, inferiores ao recobrimento das armaduras e menores que 0,25 da menor dimensão do elemento estrutural, de modo a garantir uma trabalidade adequada, sendo assim possível a sua passagem entre os varões no acto da betonagem.

A relação cimento-água é muito relevante, pois a fabricação de betão com a porção indicada de água vai permitir que sejam reduzidos os vazios — podendo para tal ser eventualmente necessário aplicar vibradores —, o que fará com que a mistura se torne mais fluida aquando da betonagem, melhorando assim, substancialmente, o seu manuseamento.

Portanto, é indispensável garantir uma certa consistência para que a consolidação aconteça de maneira satisfatória e que, posteriormente, apresente a resistência e a durabilidade pretendidas [63, 75, 76].

O projectista irá escolher o betão consoante o comportamento que espera deste, identificando, segundo a norma em vigor, NP EN 206-1:

a) Classe de resistência à compressão [N/mm²], tendo em conta também os agentes ambientais que estarão em contacto com o betão, sendo os mais utilizados os C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55 e C50/60 (Tabela B.2) e, menos comuns, C8/10 e C100/115. Estes valores advêm de ensaios a provetes, em que o primeiro número indica a resistência à compressão de provetes cilíndricos com 30 cm de altura e 15 com de diâmetro e o segundo de cubos com 20 cm de aresta.

Tabela B.2 – Classes de resistência do betão (extraído de [25]).

	C12/15	C15/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ctl} (MPa)	8	10,7	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$E_{cm(28)}$ (Gpa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37

b) Classe de exposição ambiental e código do país, como, por exemplo, XA3 (P). Nesta escolha, o engenheiro tem que ter consciência do tipo de ataques químicos, contacto com cloretos, gelo-degelo e carbonatação a que as armaduras e o betão poderão ser sujeitos (Tabelas B.3 a B.8).

Tabela B.3 – Classe sem risco de corrosão ou ataque (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
X0	–Todas as situações, excepto exposição à abrasão, ataques químicos, gelo/degelo: betão sem metais; –Ambiente seco: betão armado	Betão aplicado em interiores de ambiente pouco húmido

Tabela B.4 – Corrosão induzida por carbonatação (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar; Betão permanentemente submerso em água
XC2	Húmido, raramente seco	Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar; Betão permanentemente submerso em água; Muitas fundações
XC3	Moderadamente Húmido	Betão interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar; Betão no exterior protegido da chuva
XC4	Ciclicamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas ao contacto com água, fora do âmbito da classe XC2

Tabela B.5 – Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
XD1	Moderadamente húmido	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Betão exposto a águas industriais contendo cloretos
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento de automóveis

Tabela B.6 – Corrosão induzida por cloretos da água do mar (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contacto directo com a água do mar; Moderamente húmido	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade
XS2	Submersão permanente	Partes de estrutura marítimas
XS3	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	Partes de estrutura marítimas

Tabela B.7 – Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
XF1	Moderadamente saturado de agua, sem produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Moderadamente saturado de agua, com produtos descongelantes	Superfícies verticais de Betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de Betão expostas à chuva e ao gelo
XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; superfícies de betão expostas ao gelo e a salpicos de agua contendo produtos descongelantes; zona das estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo

Tabela B.8 – Ataque químico (extraído de [13]).

Classe	Ambiente	Exemplos
XA1	Ligeiramente agressivo	Água do mar; Solos naturais e águas subterrâneas contendo agentes químicos agressivos para o betão e para os elementos metálicos embebidos
XA2	Moderadamente agressivo	
XA3	Fortemente agressivo	

c) Classe de teor de cloretos, como, por exemplo, Cl 0,40 (Tabela B.9).

Tabela B.9 – Classes de teor de cloretos do betão (extraído de [13]).

Utilização do betão	Classe de exposição ambiental		
	XC, XF, XA	XS, XD	
Betão sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	Cl 1,1	
Betão com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,4	Cl 0,2	Podem deixar de ser aplicar se foram tomadas medidas especiais de protecção contra corrosão, como protecção do betão, ou recobrimentos, devidamente justificados, ou utilização de aço inox
Betão com armaduras pré-esforçadas	Cl 0,2	Cl 0,1	

d) Máxima dimensão do agregado, como, por exemplo, $D_{max}20$.

e) Classe de consistência, que pode ser medido através do ensaio de abaixamento (Tabela B.10), sendo o mais utilizado o cone de Abrams.

Tabela B.10 – Classes de abaixamento (extraído de [13]).

Classe	Abaixamento [mm]
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥220

Quando o betão é de alta resistência, deve ter uma classe igual ou superior à S4, sendo que para os casos de betão a aplicar em zonas de temperaturas elevadas, ser transportado em longas distâncias, a aplicar em superfícies com betão à vista, a

bombear ou a aplicar e acabar com meios tradicionais, deve a classe ser pelo menos S3. Como exemplo, pode-se ter um betão: C45/55 - XA3 (P) - Cl 0,40 - D_{max}20 - S4.

Assim sendo, é imperativo que o betão apresente a resistência para a qual foi dimensionado e que tal resistência não seja colocada em causa devido à fraca durabilidade provocada por deterioração ambiental. Para a longevidade do betão, é muito importante que este esteja especialmente protegido na fase de cura, conseguindo atingir a resistência sem adquirir imperfeições que, futuramente, poderão nefastas. Durante a cura, formam-se pequenos espaços vazios devido à evaporação da água e retracção do betão, os quais podem posteriormente servir de local de entrada de água. É importante que a relação água-cimento seja baixa, que se evitem torrões de terra ou outros materiais e que a cura seja lenta, permitindo com isto que o betão se torne mais impermeável.

Os estragos no betão podem ocorrer de diversas formas, incluindo gelo e degelo e variações muito grandes de temperatura, que irão causar expansões e contracções que irão dar origem a fendas ou à fragmentação do betão, o que, no caso de ser complementado por aço, abrirá caminho para que o oxigénio chegue a este, dando assim inicio à oxidação. Estas fendas também podem ser causadas devido a contacto com ácidos, cloretos, água, sal, sulfatos e reacções químicas entre álcalis do cimento e agregados do betão. Desta forma, a escolha de um betão de alta densidade e impermeável poderá evitar alguns destes problemas.

Além das reacções químicas, os desgastes por contactos físicos também podem ser muito prejudiciais ao betão, sendo que a areia e outras partículas transportadas pelas águas, ao embaterem no betão, desgastam-no por abrasão, o mesmo acontecendo com as areias transportadas pelo vento, apesar da corrosão neste caso ser menos célere. Desgastes provocados por impactos superiores aos previstos, tanto de blocos de gelo, embarcações ou mesmo de ondas, também poderão ser significativos.

O efeito da luz solar sobre o betão é desprezável, não afectando o seu desempenho, e o fogo muito lentamente o desgasta, apresentando a ele boa resistência [12, 13, 63, 75].

B.2.4.2 Aplicação do betão em obras costeiras

Apesar do betão ser um material adaptável, é necessário seguir determinados procedimentos para que a sua aplicação seja considerada um sucesso. O betão é geralmente encaminhado até à obra por meio de camiões betoneira, sendo o ideal ser este a despejá-lo no local próprio para a betonagem. No entanto, quando tal não for viável, o betão deve ser transportado o mais rapidamente possível do ponto de descarga do camião betoneira até ao local da sua aplicação e, posteriormente, deve ser submetido a equipamentos de compactação, de modo a espalhar-se homogeneamente e, com isto, reduzir os eventuais espaços vazios existentes. O processo de transporte pode ser feito de diversas formas, nomeadamente por tapetes rolantes, bombagem, transporte pneumático, transporte descontínuo, queda livre ou plano inclinado, dependendo das distâncias, das acessibilidades e dos equipamentos disponíveis.

O betão não deve ser despejado bruscamente, em queda livre, nem de elevadas alturas, de modo a manter a granulometria dos inertes e evitar que a mistura torne-se heterogénea.

Os tapetes rolantes são uma mais valia quando instalados entre dois pontos fixos, o que os transforma numa ponte de constante passagem de material, podendo ainda ser acoplados a outros tapetes, capazes de rodar e atingir outras zonas da obra.

O uso de bombagem no transporte de betão pode ser mais ou menos eficaz, consoante a capacidade da máquina e dos componentes que a complementam, dos percursos que o betão tomará até ao destino e das dosagens e dos tipos de inertes que compõem o próprio betão, que influenciam no atrito entre o material e o equipamento, sendo este um método utilizado no caso de grandes volumes de betão em regime constante.

O transporte pneumático diferencia-se do de bombagem pela introdução do ar comprimido, que faz com que o betão seja movido a velocidades notáveis, de alguns metros por segundo, sendo este método útil em regiões muito quentes,

nas quais o betão seca mais rapidamente e não flúi satisfatoriamente por bombagem, além de ser igualmente eficaz em betonagens descontinuadas e de pequenas quantidades.

O transporte descontínuo acontece, sobretudo, com o auxílio de veículos motorizados, carros de mão, vagonetas sobre carris e baldes movidos por gruas.

A vibração posterior à betonagem, que objectiva eliminar os vazios e provocar uma distribuição mais homogénea dos agregados e da água, não deve ser feita em demasia, de modo a evitar o efeito contrário, que daria origem a uma pasta não uniforme.

Deve ser garantida a betonagem de estruturas inclinadas sempre de baixo para cima, evitando a adição de água ao betão para que este flua melhor, situação que poderá adulterar a resistência pretendida.

Para a adequada durabilidade de uma obra costeira, em que o contacto com diversos agentes erosivos é constante, é importantíssimo que as cofragens sejam bem colocadas, respeitando os valores que distam das armaduras à face da peça, isto é, os recobrimentos, conforme indicado na Tabela B.11.

Tabela B.11 – Recobrimentos mínimos, dosagens de cimento máximas e razão A/C máxima (extraído de [13]).

Tipo de cimento	Classe de exposição	Recobrimento nominal mínimo (mm)	Dosagem de cimento mínimo (kg/m^3)	Razão A/C máxima	Classes de resistência mínima	
					Betão normal	Betão leve
[–]	X0	[–]	[–]	[–]	C12/15	[–]
CEM I; CEM II/A	XC1	25,00	240,00	0,65	C25/30	LC25/28
	XC2	35,00				
	XC3	35,00	280,00	0,60	C30/37	LC30/33
	XC4	40,00				
	XS1/XD1	45,00	360,00	0,45	C40/50	LC40/44
	XS2/XD2	50,00				
	XS3/XD3	55,00	380,00	0,40	C50/60	LC50/55
	XF1	[–]	280,00	0,60	C30/37	LC30/33
	XF2			0,55		
	XA1	[–]	340,00	0,50	C35/45	LC35/38
	XA2		360,00	0,45	C40/50	LC40/44
	XA3		380,00			
CEM II/B; CEMIII/A; CEM IV; CEM V/A	XC1	25,00	260,00	0,65	C25/30	LC25/28
	XC2	35,00				
	XC3	35,00	300,00	0,55	C30/37	LC30/33
	XC4	40,00				
	XF1	[–]				
	XF2			0,50		
CEM IV/A; CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEMII/B; CEM II/A-D	XS1/XD1	45,00	320,00	0,55		
	XS2/XD2	50,00				
	XS3/XD3	55,00	340,00	0,45	C35/45	LC35/38
	XA1	[–]	320,00	0,55	C30/37	LC30/38
	XA2		340,00	0,50	C35/45	LC35/38
	XA3		360,00	0,45		

Após a betonagem, a cura e a posterior descofragem são também decisivos, sendo que o tempo de cura do betão depende de diversos factores, incluindo a temperatura ambiente, o tipo de betão e o contacto com água. Nas obras costeiras, é usado essencialmente betão de alta resistência, que consegue atingir valores precoces de resistência, podendo na maioria dos casos ser descofrado após três dias, uma vez que este período é suficiente para garantir índices elevados de impermeabilidade, não sendo portanto as armaduras afectadas pelos cloretos. A cofragem deve ser bem limpa e oleada antes de ser aplicada, permitindo com isto a obtenção de peças mais lisas, com menor quantidade de poros e menos pontos permeáveis.

Tanto as variações de temperatura quanto os congelamentos e as falhas de descofragem podem originar fendas no betão, as quais devem ser reparadas com o emprego de betão, argamassas ou produtos epoxy.

O betão é aplicado em diferentes tipos de estruturas costeiras, como molhes e quebra-mares, sendo dele que são feitos os diversos tipos de blocos para protecção descritos no Capítulo 5, incluindo os tetrápodes e os blocos Antifer.

O betão é aplicado como revestimento de diques, molhes e outras estruturas com núcleos de diversos materiais TOT, tornando-as mais impermeáveis, e como material ligante, objectivando não permitir que as rochas se movam devido à acção das ondas e correntes. É um material também inevitavelmente utilizado em muros de suporte e paredões, para a contenção e a protecção de terras, sendo ainda aplicado em canais de navegação e de drenagem de águas.

O betão também pode ser utilizado em estruturas flutuantes, emissários submarinos, barreiras protectoras, docas e instalações terrestres, sob a forma de vigas, colunas, lajes, pavimentos e pontes [12, 13, 14, 15, 63].

B.2.4.3 Betonagem imersa

Betonar dentro de água é, por vezes, necessário. Para ser tal procedimento bem sucedido, as características do próprio betão têm de ser as mais adequadas ao emprego de baldes com abertura pelo fundo, ao avanço do betão em talude e ao emprego de tremonhas. No caso de emprego do betão em sacos, não têm muita relevância o nível de abaixamento e a granulometria.

O emprego de baldes com abertura pelo fundo [12] é um método utilizado quando existe espaço razoavelmente grande para trabalhar e alturas superiores a 80 cm, no qual o balde tem um movimento descendente — normalmente alcançado por meio de uma grua — e, quando chega à cota pretendida, faz-se o balde abrir, depositando o betão, voltando em seguida o balde a subir, porém agora vazio (Figura B.6). Os movimentos descendente e ascendente devem ser lentos, de modo a garantir que o betão escoe e espalhe-se convenientemente.

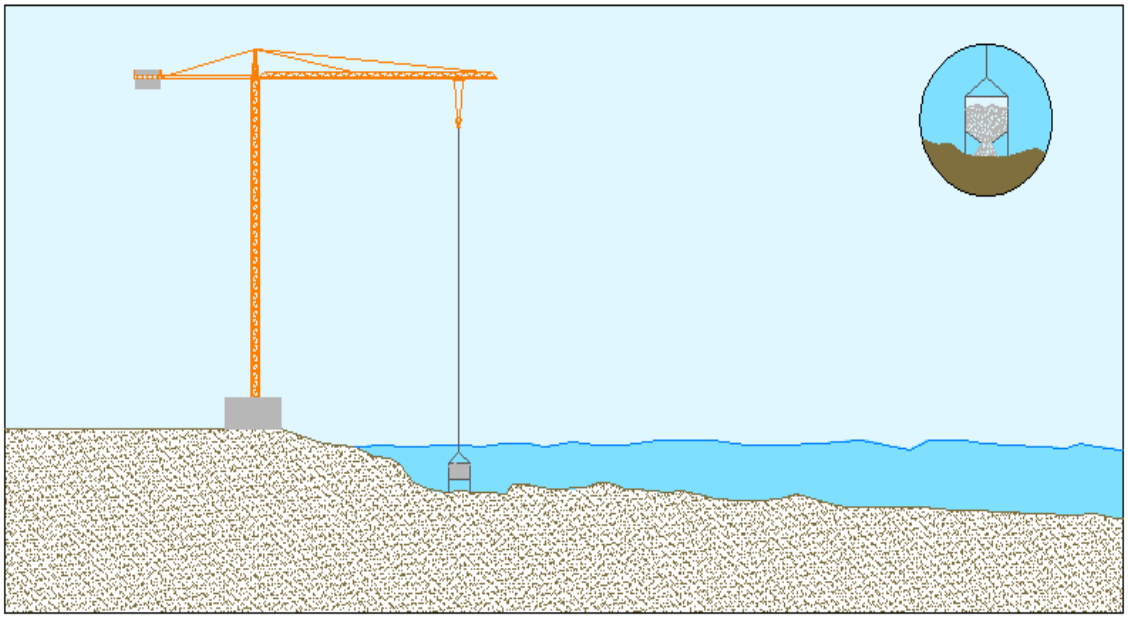

Figura B.6 – Processo de betonagem imersa por meio de balde.

O avanço do betão em talude [16], por sua vez, é um processo de deposição de betão (Figura B.7) contínuo e sem impactos, de forma a que não haja uma movimentação mais significativa de água sobre o talude, sendo que a altura a partir

da qual o betão é depositado não deve ultrapassar os 80 cm. Trata-se, assim, da incorporação do betão sobre uma massa, massa esta que, devido ao peso específico superior do betão, será naturalmente escoada sobre o talude.

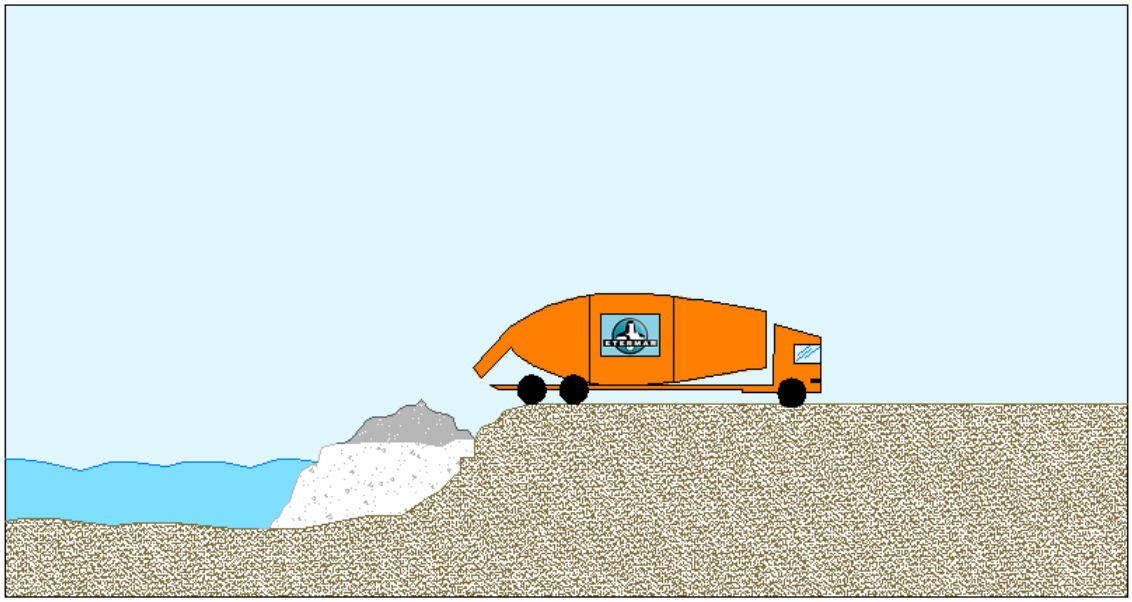

Figura B.7 – Betonagem dentro de água pelo método do avanço em talude (adaptado de [16]).

O emprego de tremonhas é um método utilizado, sobretudo, quando se pretendem paredes verticais. Este processo permite atingir alturas significativas e evitar grandes movimentos de terra. Neste caso, a composição do betão requer alguns cuidados, de forma a possibilitar que possa descer livremente pelo tubo, sendo que uma ponta do tubo é varrida por um tampão que evita a entrada de água, desce com o peso do betão e depois se perde (Figura B.8). Outro método consiste na colocação do tubo no fundo, com uma rolha na base, enchendo-se o tubo com betão e elevando-se o mesmo cerca de 15 cm, o que fará com que a rolha salte devido à pressão exercida pelo betão, permitindo assim que o betão se espalhe [16].

Figura B.8 – Colocação do betão por meio de tremonhas (extraído de [19]).

O emprego de betão em sacos acontece quando existem correntes marítimas que impossibilitam a aplicação de outros métodos. Este processo prevê a colocação de sacos permeáveis de betão no fundo, com auxílio de gruas e de mergulhadores, que os acomodam uns aos outros, uma vez que estes são maleáveis [16].

B.2.4.4. Aditivos e adjuvantes

Os aditivos e os adjuvantes são elementos que podem ser acrescentados ao betão e às argamassas com o intuito de alterar as suas composições.

Os adjuvantes são componentes utilizados em proporções inferiores a 5% da massa de cimento, existindo inúmeras razões para a sua utilização, sendo a seguir enunciados os tipos de adjuvantes mais conhecidos: plastificantes ou redutores de água de amassadura, introdutores de ar, hidrófugos, aceleradores e retardadores de presa, aceleradores do endurecimento, expansivos, pigmentos, adição de polímeros orgânicos, inibidores de corrosão das armaduras, fungicidas, insecticidas e germicidas.

Assim, tais adjuvantes apresentam funções distintas, tais como atrasar ou acelerar a presa, aumentar as tensões de rotura, proporcionar a expansão da mistura, modificar a cor do betão, melhorar o seu manuseamento, aumentar a resistência a períodos de congelamento e descongelamento, impedir a corrosão das armaduras ao tornar o betão mais impermeável, aumentar a aderência ou formar betão leve.

Já os aditivos são materiais capazes de alterar a composição do cimento Portland, podendo ser empregues em porções inferiores ou superiores a 5% da massa do cimento, tendo como condição que, no caso de constituírem menos de 5%, não poderão influenciar a pasta no estado fluido, no processo de consolidação e no próprio estado sólido. Os aditivos são constituídos essencialmente por duas famílias, pozolanas e escórias de alto-forno, podendo as pozolanas ser naturais, artificiais ou subprodutos industriais ou da agricultura, como sílica de fumo e cinzas volantes.

Tais aditivos são usados para dar ao betão elevadas tensões de rotura, criar betões expansivos, torná-los mais resistentes à água do mar, diminuir dosagem de cimento, baixar o calor de hidratação e aumentar a trabalhabilidade, entre outras aplicações [12].

B.2.5 Polímeros

B.2.5.1 Especificidades

Os polímeros são materiais com características ímpares, cuja aplicação nas obras costeiras e marítimas é relativamente recente e, portanto, não muito desenvolvida. Podem aparecer sob diversas formas e feitios, com inúmeras aplicações, sendo usualmente predominantes em tubagens, elementos de junção ou vedação em silicone, revestimentos e impermeabilizações, perfis, isolamento térmico e acústico, geotêxteis, instalações eléctricas, aditivos para betão e geomembranas (PVC, CPE e ECB).

Os plásticos são um dos elementos provindos dos polímeros, sendo destes os mais utilizados em obras costeiras. Os polímeros, dependendo das suas características térmicas e mecânicas, são divididos em três grupos, nomeadamente os elastómeros, os termoendurecíveis e os termoplásticos.

Os elastómeros são um polímero que apresenta características idênticas às das borrachas, pois retornam ao seu formato inicial após submetidos a acções que os deformam elasticamente.

Os termoendurecíveis são plásticos rígidos, geralmente frágeis e que, após desenformados, isto é, curados, não devem voltar a amolecer, sob pena de serem alteradas as suas características. Tal como o próprio nome indica, um plástico que, para a sua produção, necessita de calor, podendo a sua cura acontecer com a adição de químicos para acelerar o processo ou à temperatura ambiente.

Em relação aos termoplásticos, estes também necessitam de calor sua produção, podendo ser, no entanto, reaquecidos e reenformados, mantendo praticamente inalteradas as suas características.

É possível produzi-los com forma, rigidez e dureza bastante distintas, dependendo dos componentes que os constituem e da maneira como estes são produzidos, podendo ser por meio da aplicação de pressão, calor ou os dois em simultâneo.

Os plásticos são maioritariamente produtos sintéticos, compostos essencialmente por dois grandes componentes, o carbono e o hidrogénio, provenientes do petróleo bruto. Além disto, podem ser a eles adicionados diversos componentes ou revestimentos, com vários intuitos, sendo que, no caso das obras marítimas, é normal o emprego de aditivos para preservar os plásticos expostos à radiação solar. Assim sendo, a cobertura de elementos plásticos com água, terra, areia, algas ou outro material pode significar uma durabilidade superior do plástico.

O comportamento mecânico associado à dureza de um plástico é algo relativo, pois depende muito da temperatura a que este está exposto, oscilando tais valores em

demasia, podendo apresentar um comportamento frágil e quebradiço em temperaturas negativas e ser extremamente flexível a temperaturas elevadas.

Com fins estruturais, podem ser adicionadas fibras ao plástico, de modo a obter uma melhor resistência, sendo que o plástico mais indicado advém dos copolímeros. O plástico é um bom material para aplicar nas obras, pois é resistente à corrosão e flexível, sendo capaz de absorver os impactos, além de ser leve, bom isolante eléctrico e impermeável. Por outro lado, pode ser um material caro, é incendiável, apresenta baixa resistência ao calor e é de difícil de reparação.

Nas obras costeiras, o plástico tem um papel importante a nível dos geotêxteis — outrora concebidos em algodão —, mais correctamente denominados como geosintéticos, por serem constituídos por fibras sintéticas, sendo concebidos a partir de quatro famílias principais de polímeros, nomeadamente poliamida, polietileno, poliéster e polipropileno. A escolha do geotêxtil a aplicar pode ser difícil, pois, para além de existem muitos fabricantes, apresentam propriedades bastante distintas, tal como mostra a Tabela B.12.

O geotêxtil muitas vezes é submetido à acções das ondas ou a movimentos da própria estrutura a que este pertence e tem que resistir, possuindo alguma elasticidade, porém, no caso de se alongar demais, poderá levar a que os poros aumentem, podendo com isto deixar de desempenhar satisfatoriamente as funções a que se destina, ao permitir a passagem de sedimentos mais finos.

A escolha de um tecido mais grosso pode permitir a colocação directa de grandes pedras sobre o geotêxtil durante a construção, fugindo à habitual camada de rochas mais pequenas sobre o tecido. Contudo, nestas situações, será pertinente evitar rochas angulares, uma vez que a probabilidade de perfurarem o geotêxtil é maior. A não colocação de uma camada de rochas mais pequenas implicará um número maior de vazios, o que pode fazer com que as pressões do solo ou hidrostáticas levem a um aumento dos poros do tecido. Para além da espessura, o projectista deve ter em atenção outras características do geotêxtil, como a

porosidade, a transmissividade, a resistência à tracção, a deformabilidade e a resistência ao punçoamento e ao rasgamento.

Tabela B.12 – Comparação das características dos polímeros (testados com o mesmo peso) (adaptado de [78]).

		Polímeros			
Características		Poliéster	Poliamida	Polipropileno	Polietileno
Resistência	Tracção	Grande	Média	Pequena	Pequena
	Álcalis	Pequena	Grande	Grande	Grande
	Microrganismos	Média	Média	Média	Grande
	Óleos	Média	Média	Pequena	Pequena
	Detergentes	Grande	Grande	Grande	Grande
	Raios U-V estabilizados	Grande	Média	Grande	Grande
	Raios U-V instabilizados			Média	Pequena
	Deformação	Média	Média	Grande	Grande
Custo		Grande	Média	Pequena	Pequena
Massa surfácica		Grande	Média	Pequena	Pequena

Os geotêxteis mais comuns são os não-tecidos e os tecidos (Figura B.9), sendo que ambos têm proveitos diferentes. O não-tecidos são produzidos pela ligação — por colagem, soldagem ou agulhagem — de fibras arranjadas aleatoria ou direccionalmente, vulgarmente conhecidas como feltros ou tapetes. Os tecidos com aparência mesmo de tecido, com poros uniformes são produzidos pelo entrelaçar de dois fios, formando ângulos rectos. Além destes, existem outros tipos de geotêxteis, menos utilizados, como os tecidos de bandas largas, os tricotados, os alveolares e os acolchoados.

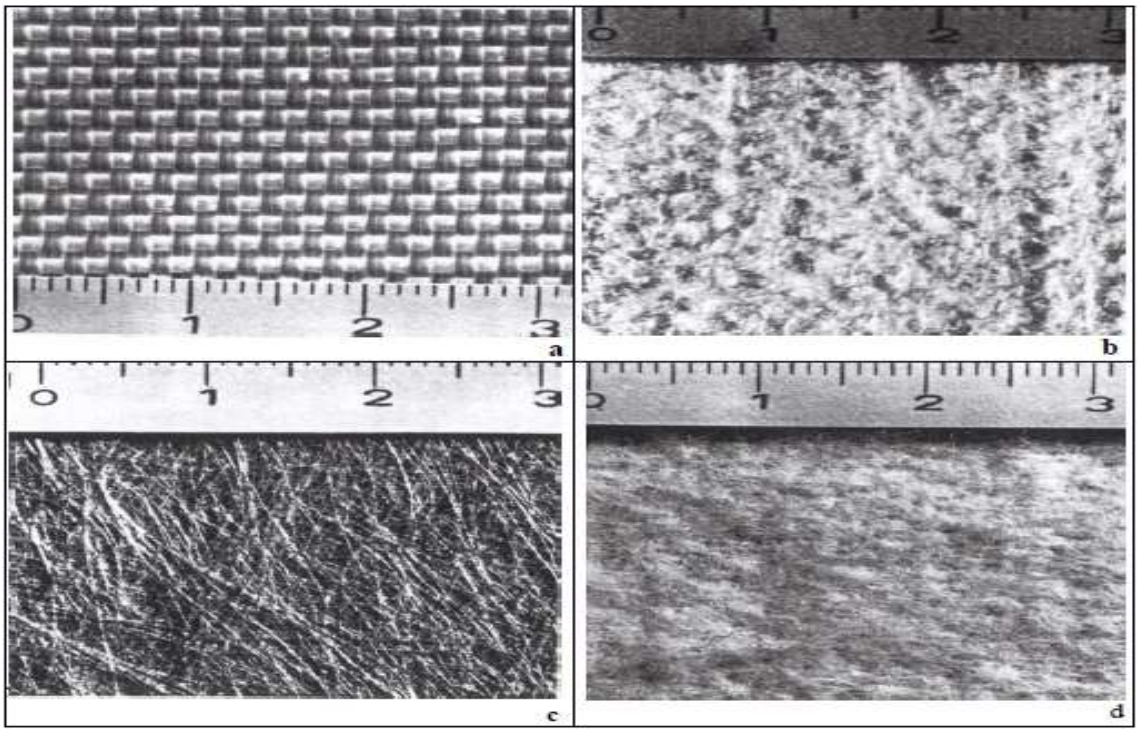

Figura B.9 – Tipos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido; b) geotêxtil não tecido ligado quimicamente; c) geotêxtil não tecido ligado termicamente; d) geotêxtil não tecido ligado mecanicamente por agulhagem (extraído de [11]).

A durabilidade dos geotêxteis depende muito da exposição aos raios solares, mas também de outros factores, como a sua composição química, as propriedades físicas do tecido, as forças aplicadas e as variações de temperatura.

O manuseamento do material pode ser complexo, pois muitas vezes possuem um peso específico inferior ao da água, podendo ser assim necessário utilizar técnicas de colocação dos tecidos tanto em zonas de água, acamando-o com uma camada de material mais denso, como em zonas ventosas.

A maior parte dos materiais sintéticos não requer grandes cuidados a nível de transporte, sendo usual transportá-los pelos meios convencionais.

A manutenção será tanto maior quanto mais estiver exposto o geotêxtil e quanto mais frequentes forem os impactos que o podem desgastar por fadiga. Sendo um material geralmente com boa resistência aos químicos naturais, não se pode dizer o mesmo em relação ao seu contacto com combustíveis poluentes, que podem

reagir com o polímero. O fogo e o plástico são, sem dúvida, dois elementos que não podem se confrontar, uma vez que o fogo tem a capacidade de, com maior ou menor rapidez, desagregar o plástico, retirando-lhe capacidades e libertando gases nocivos [8, 9, 10, 11, 17].

B.2.5.2 Aplicação dos plásticos em obras costeiras

A aplicação dos plásticos nas obras costeiras é vasta, pelo facto destes não se oxidarem e apresentarem normalmente uma boa resistência, sendo exemplos dessas aplicações a utilização de poliéster reforçado por fibras especiais em tubagens, o uso de resinas epoxy como reboco químico sobre o betão e o seu emprego como revestimento contra a corrosão de diferentes elementos.

Tecidos plásticos de alta resistência podem ser usados com moldes de betão injectado, formando colchões de protecção de encostas. Folhas plásticas são frequentemente usadas como elementos protectores de componentes metálicos durante a obra, para evitar o contacto com a água do mar e de chuvas, areias e outros elementos abrasadores.

São também diversas as aplicações dos geotêxteis na construção civil, assumindo funções de separação, drenagem, reforço, protecção e filtragem, sendo este último o que mais contribui para as obras costeiras, conservando o solo, retendo os finos e permitindo a passagem da água (Figura B.10).

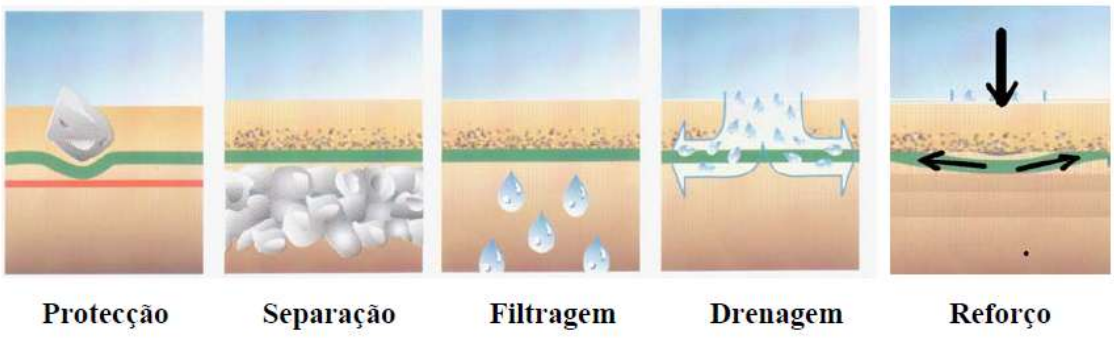

Figura B.10 – Funções dos geotêxteis (extraído de [11]).

A aplicação de um geotêxtil como protector acontece quando queremos que este evite, ou pelo menos reduza, as acções erosivas a uma camada. No caso das obras marítimas, o emprego de um geotêxtil com funções de protecção é comumente feito por meio da sua aplicação no solo abaixo das estruturas de enrocamento, a fim de evitar a erosão provocada pelas ondas e correntes e, consequente, o colapso da estrutura. Podem ser também utilizados para proteger geomembranas, dissipando tensões a que estas estejam sujeitas e evitando perfurações, situações estas recorrentes em canais, tanques e lagoas. Podem ser ainda aplicados em taludes (Figura B.11) ou mesmo em superfícies planas e outras obras costeiras, objectivando evitar a erosão.

Figura B.11 – Aplicação de geotêxtil num talude (extraído de [21]).

Os geotêxteis podem ser ainda úteis como separadores, isto porque por vezes, é necessário que duas camadas diferentes de solo não entrem em contacto directo e não se misturem, de modo a manter certa heterogeneidade e as características de cada uma, sobretudo quando um dos solos é mole e coesivo, situação esta que se pretende em zonas pavimentadas, de forma a evitar perdas de resistência, melhorar a drenagem e, consequentemente, a durabilidade (Figura B.12).

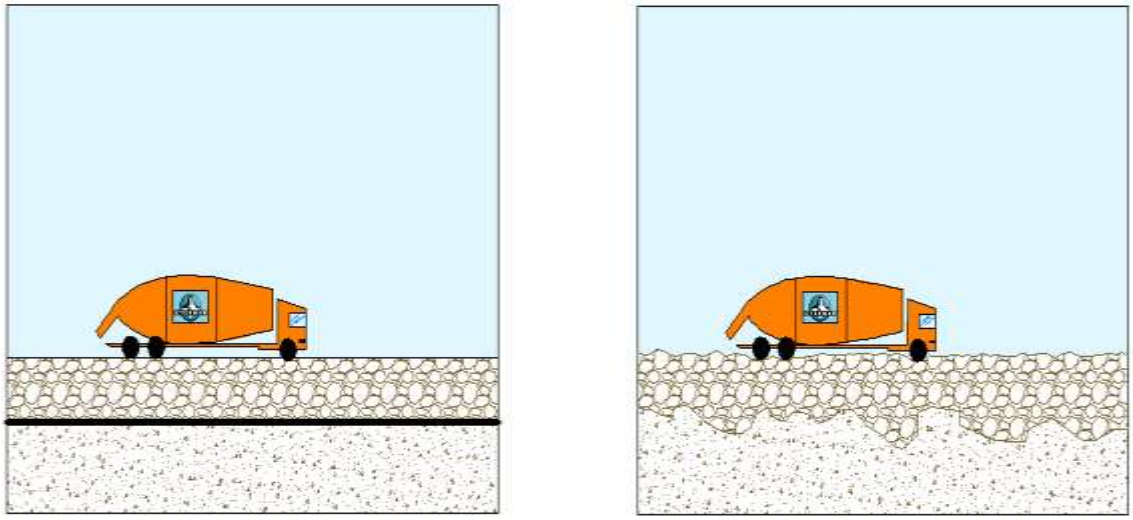

Figura B.12 – Solo com geotêxtil separador (à esquerda) e sem geotêxtil (à direita).

A filtragem é a aplicação de um geotêxtil em situações em que, perpendicular a este, são previstos contactos com líquidos, os quais se pretende deixar passar, mas evitando que arrastem partículas do solo de onde provêem, situação esta corrente em barragens de terra e em muros de suporte (Figura B.13), assegurando desta forma uma boa drenagem. Nos casos em que não são aplicados geotêxteis, a água pode não conseguir ultrapassar o muro, originando pressões hidrostáticas e o seu consequente derrube.

Figura B.13 – Aplicação de geotêxtil num muro de gabiões (extraído de [22]).

Aplicar um geotêxtil com funções drenantes significa que este servirá de barreira aos fluidos e, em seguida, os encaminhará, situação frequente em canais de água ou em solos quando há a intenção de transportar água numa direcção (Figura B.14).

Figura B.14 – Colocação de geotêxtil drenante num canal (extraído de [20]).

O reforço através de um geotêxtil é possível, uma vez que este material apresenta boa resistência à tracção, conferindo estabilidade e capacidade de suporte. O geotêxtil transmite as tensões no solo e deforma-se, distribuindo as cargas a ele aplicadas, sendo esta uma solução usada, por exemplo, em pavimentos sobre solos moles e na construção de taludes de aterro, como mostrado na Figura B.15.

Figura B.15 – Geotêxtil como separador de solos distintos (extraído de [22]).

Para que o geotêxtil tenha sucesso, para além de ter de ser uma escolha acertada pelo projectista, a sua colocação deve seguir alguns procedimentos. Desde logo, a junção de tecidos deve ser cuidada, uma vez que, por motivos de fabrico e transporte, apresentam comprimentos longos e larguras relativamente estreitas. Logicamente, quanto mais largo for o geotêxtil, menos sobreposições serão necessárias efectuar, sendo que as ligações devem ser de 45 cm e 100 cm, sendo que o de baixo é sobreposto pelo seguinte para aplicações acima e abaixo do nível de água, respectivamente, em situações de painéis sujeitos a forças de tracção. Estas ligações podem ser feitas antes ou durante a aplicação na obra e por cimentação ou costura.

No caso de ser necessária manutenção do geotêxtil, a parte a reparar deve se estender por pelo menos 60 cm, em toda a volta, devendo ser colocado por baixo do já existente. Por vezes, pode ser conveniente substituir todo o painel, nomeadamente na situação em que este está submetido a forças de tracção.

Para que estas situações sejam evitadas ao máximo, é pertinente que a colocação dos geotêxteis seja feita por operários experientes, que os consigam colocar sem

esticá-los e sem formar rugas ou dobraduras, de forma a moldarem-se ao perfil do terreno quando lhes são depositadas as rochas ou outros materiais pesados [8, 11, 17].

B.2.6 Madeiras

B.2.6.1 Especificidades

A madeira, como elemento estrutural, é um material muito complexo, heterogéneo e isotrópico, sendo difícil estabelecer exactamente a sua capacidade resistente, pois de uma mesma árvore é possível extrair vários elementos, de diferentes texturas, porosidades, cores, humidades, durezas e durabilidades.

A durabilidade da madeira está dependente de diversos factores, entre os quais o local em que será implantada, a sua espécie, que caracteriza a sua porosidade, a existência de componentes extraíveis, como resinas, e a sua permeabilidade. Geralmente, uma madeira densa tem uma maior longevidade, com algumas excepções — como, por exemplo, o amieiro e a faia —, mas depende essencialmente a que elementos estará exposta e da manutenção a que será sujeita.

No caso das obras costeiras, que, como se compreende, são locais constantemente húmidos ou submersos, a madeira tem menos durabilidade que o betão, uma vez que a humidade é, porventura, o maior inimigo da madeira, visto que a madeira seca absorve a água e incha, tornando-se menos durável. A situação contrária também se verifica no caso de zonas muito secas, onde a madeira liberta água, retrai-se e, consequentemente, perde peso, fenómeno este denominado retractilidade.

No caso de elementos de madeira constantemente imersos, como, por exemplo, estacas, estes podem ter longa duração, mas nunca igual à da madeira seca em ambientes igualmente secos, que é a mais utilizada em obras costeiras e a mais

combustível. A durabilidade da madeira pode também ser severamente afectada pelos elementos de ligação, no caso de serem estes oxidáveis.

O manuseamento é tanto mais fácil quanto menos duras forem as madeiras, encabeçando a lista das mais duras o pau-preto e o pau-santo. A facilidade de trabalhar a madeira também depende de outros factores, nomeadamente da humidade, bem como da sua densidade e das anomalias nela presentes.

Ao contrário do aço, a madeira, quando submetida a variações significativas de temperatura, não apresenta alterações expressivas das suas dimensões, factor este desprezável a nível de esforços no dimensionamento de estruturas em madeira.

Como já foi referido, a madeira é um material isotrópico e, portanto, não tem a mesma capacidade de resistir a acções nos diferentes eixos, sendo as mais importantes a tracção, a compressão, a flexão, o choque e o corte. Outras características mecânicas importantes na madeira são a fendilhação, a elasticidade, a fluência e a fadiga. A análise à madeira é feita em três eixos:
— Plano tangencial, delimitado pelos círculos de anéis tangentes às camadas;
— Plano longitudinal, paralelo ao eixo;
— Plano radial, perpendicular à face transversal ou perpendicular ao eixo;

A nível de projecto, as madeiras submetidas a compressões devem ser posicionadas de forma a que o ponto de aplicação seja paralelo às fibras, conseguindo-se assim uma melhor resistência do que se fosse na perpendicular, o que denuncia que este material é mais resistente à compressão axial do que à compressão tangencial. O corte da madeira, sempre que possível, deve ser efectuado no plano radial, como forma de protecção contra o desgaste, conferindo boa resistência quando submetida a tensões e evitando deformações e flexões nas fibras.

A tracção, ao contrário da compressão, deve ser submetida às fibras paralelas da madeira, apresentando uma deformação quase linear até à rotura em relação à tensão aplicada, sendo a resistência à flexão comummente boa.

É certo que existem inúmeros tipos de madeira e que todas apresentam índices diferentes, mas as madeiras geralmente não ostentam grande resistência ao choque, especialmente as do tipo resinoso. Assim sendo, a resistência ao corte não é um ponto forte da madeira, a qual é ainda mais afectada quando se trata de uma peça de madeira com irregularidades, pois esta resiste muito menos ao corte quando este se dá com orientação paralela às fibras, tornando-se este um problema sério, por exemplo, no caso de vigas de grande comprimento [18, 23].

O vento e a água que movimentam areia, o roçar das embarcações, bem como outros contactos, podem ser um factor de desgaste da superfície da madeira, fazendo com que a consequente redução da secção possa influenciar na sua resistência às cargas aplicadas. Nos casos em que se prevê um desgaste rápido da madeira, como quando esta for colocada em acessos a cais, portos, pilares de pontes ou vulnerável a vandalismos, será pertinente equipar essas zonas com instrumentação capaz de evitar acidentes e realizar inspecções periódicas. A chuva e a água dos rios e do mar, quando em contacto com madeiras não tratadas ou com tratamentos ineficazes, fazem com que estas absorvam a água, amoleçam as fibras e percam resistência.

O fenómeno da retractilidade origina fendas na madeira, que, por sua vez, poderão ser um meio de entrada para insectos ou mesmo de organismos marinhos, quando submersas, tornando-se assim pontos fracos que, com o tempo, poderão ser um foco de apodrecimento da madeira. Sendo a madeira um material combustível, é importante prevenir o seu contacto com o fogo, sobretudo no caso de madeira seca.

A madeira pode ser uma boa solução a aplicar em zonas de sismicidade, uma vez que apresenta alguma elasticidade, tornando a estrutura menos rígida, podendo ser igualmente importante contra embates de navios ou ondas, absorvendo esforços elevados [7, 18].

B.2.6.2 Aplicação da madeira em obras costeiras

A madeira é um material multifacetado, tendo diversas aplicações em obras costeiras permanentes ou provisórias, podendo ser aplicada em diques, plataformas flutuantes, pilares, revestimentos, estacas e elemento de contenção, entre outras aplicações.

A madeira serrada que é utilizada em componentes estruturais é seleccionada de acordo com o tamanho, a espécie e o objectivo a que se destina, tendo como principais interesses a resistência à flexão e à compressão e a sua elasticidade.

A madeira serrada não tratada, tal como o nome indica, é uma madeira virgem, isto é, à qual não foram aplicados químicos para preservá-la, sendo, portanto, mais barata que a madeira tratada, porém menos durável, sobretudo quando em contacto com o solo ou com a água do mar, o que leva a que seja aplicada durante alguns meses, enquanto a obra decorre, em funções como, por exemplo, a contenção de solos ou o suporte de máquinas, enquanto demonstra alguma resistência, sendo posteriormente removida. No caso de obras de longa duração, é comum a madeira ser pintada na obra de forma a criar uma camada protectora, prolongando desta forma, por mais algum tempo, a sua capacidade.

Por outro lado, a madeira serrada pode ser tratada na fábrica, conferindo-lhe resistência a ataques de insectos e fungos e criando uma barreira impermeável que impede o seu rápido deterioramento. Este tratamento, explicado a seguir, destina-se a ser aplicado em madeiras com funções permanentes na vida da obra costeira, sobretudo para pilares de pontes e cais, elementos de protecção e molhes, entre outros, sendo de referir que as madeiras utilizadas em estacas são usualmente o salgueiro e o amieiro [7, 18].

B.2.6.3 Tratamentos de preservação aplicados à madeira

As madeiras que se projectam em aplicações costeiras não provisórias querem-se duradouras, resistentes a fungos, insectos e à erosão provocada por acções físico-

químicas. Desta forma, as madeiras utilizadas em obras costeiras deverão ser sujeitas a tratamentos de prevenção, mais ou menos complexos conforme a vida útil pretendida para o material e as condições ambientais a que estarão expostas.

A durabilidade que a madeira terá será influenciada tanto pela qualidade do preservante usado, podendo este ser 100% químico ou resultante de misturas, quanto pela forma com que este foi aplicado, que tem influência na sua permanência na madeira e na resistência da mesma aos diferentes ataques.

Existem vários processos de tratamento de madeiras, que devem ser escolhidos conforme o local de implantação da madeira, o tipo de ambiente a que estará sujeita, a espécie de madeira, a humidade que apresenta e a duração que se pretende que a mesma atinja.

A madeira utilizada em obras costeiras, sobretudo em construções que entrem em contacto com a água salgada, deve ser tratada segundo o método da impregnação por pressão. Este processo consiste na injecção do preservante, usualmente óleo creosoto, com pressões que variam conforme a permeabilidade da madeira e que podem chegar aos 1,5 Mpa, devendo durar tal tratamento no mínimo uma hora.

Existem ainda outros processos de tratamento de madeiras, como a impregnação por vácuo, a difusão a imersão a quente-frio em tanque aberto, a imersão rápida, a imersão prolongada e a pincelagem por aspersão [7, 18].