

# **PROJECTO DE UM SISTEMA DE QUEBRAMARES DESTACADOS PARA A FRENTE MARÍTIMA DA FOZ DO RIO DOURO NO PORTO**

**SÉRGIO PEDRO DE MATOS DUARTE**

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS  
E AMBIENTE**

---

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

JUNHO DE 2009

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **AGRADECIMENTOS**

No final do meu percurso académico não poderia esquecer todos aqueles que me ajudaram a chegar aqui.

Em primeiro lugar devo lembrar a ajuda do meu orientador, Professor Francisco Taveira Pinto, ao qual sinceramente agradeço por todo o apoio e disponibilidade particularmente no decorrer deste semestre. Obrigado por tudo o que ensinou durante a realização deste trabalho e por toda atenção prestada.

Agradeço ao Engenheiro Joaquim Pais Barbosa pela paciência e ajuda na utilização do software ArcGIS, sempre que o solicitei.

Não posso deixar de referir outros professores que me fizeram chegar aqui, destacando o Professor Fernando Veloso Gomes pelos conhecimentos transmitidos no âmbito da disciplina de Trabalhos Marítimos. Através das suas aulas criei o gosto por esta matéria e é também graças a ele que escolhi este tema.

Obrigado também a todos os meus colegas pelas experiências que juntos passámos ao longo deste ano.



## RESUMO

A frente marítima da cidade do Porto sempre se apresentou como um local de excelência para o lazer, e pode-se dizer que isso se deve à sua paisagem e à existência de uma frente de mar. A zona imediatamente a norte da foz do Rio Douro apresenta-se estável no que diz respeito à sua linha de costa, não sendo uma zona em que se verifiquem erosões significativas, mas também não há sedimentação significativa. De certo modo isso está relacionado com o clima de agitação, com a presença de muitos afloramentos rochosos e com o limitado transporte de sedimentos que ocorre de Norte. Contudo, a acção da agitação pode ser prejudicial, pois chega à linha de costa com bastante energia, chegando a atingir alguns arruamentos marginais.

Perante esta situação, procurou-se uma solução que permitisse melhorar as condições locais para os vários utilizadores. A construção de um sistema de quebramares destacados apresenta-se como uma possível via, na medida em que além de provocar a pré-rebentação das ondas criaria condições para acumulação de sedimentos, dando melhor qualidade às praias da zona. Os quebramares destacados, pelo seu funcionamento hidráulico, criam zonas de águas calmas, melhorando as condições das praias protegidas.

Durante o projecto procurou-se que as estruturas se integrassem o melhor possível no local, de modo a minimizar impactes negativos. Parâmetros como o comprimento das estruturas e a cota de coroamento foram condicionados por factores como a circulação da água, pois pretende-se uma zona de águas calmas mas não a estagnação das águas. A construção de uma única estrutura não é viável, porque face à área a proteger se tornaria uma estrutura de dimensões exageradas e a renovação das águas na zona protegida seria diminuta. Foi por isso estudada a implantação de duas estruturas, de igual comprimento. Esta opção permitiu ainda que o local de implantação de cada estrutura fosse definido de acordo com as condições locais.

No decorrer do projecto foram considerados como elementos de base diversos estudos já realizados e que foram aplicados tanto ao dimensionamento hidráulico como ao dimensionamento estrutural. Relativamente ao funcionamento hidráulico, o projecto foi desenvolvido através de métodos empíricos relacionados com o coeficiente de transmissão, tais como Briganti *et al.* (2003), e com a resposta da linha de costa perante a construção da estrutura, nomeadamente Daily e Pope (1986), Pilarczyk (2003) e Suh e Dalrymple (1987). Recorrendo à utilização do método JMC, ele permitiu definir o melhor local para a implantação das estruturas. Finalmente com base em metodologias como a de Ming e Chiew (2000) foi possível conhecer as dimensões da formação a sotamar. Em termos estruturais procurou-se aplicar fórmulas que fornecessem resultados com base em vários factores que nem sempre são considerados em conjunto. Assim recorreu-se às fórmulas de Hudson (1974), van der Meer (1988), Powell e Allsop (1985) e Vidal *et al.* (2001).

Face aos resultados obtidos, a solução proposta foi aquela que se julga ser a que melhor conjugará, de forma equilibrada, a protecção desejada para o local e o mínimo de impactes negativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Protecção Costeira, Quebramares Destacados, Foz do Porto, Rio Douro.



## ABSTRACT

The landscape and seafront in Oporto city has made Foz do Porto known as a place of leisure. As to the shoreline, the area near the mouth of the Douro River is stable, hence there is not significant erosion nor significant sedimentation. This can be related to the local wave climate, the presence of rocks and the small amount of sediment transportation from North. Nevertheless, the energetic sea conditions can be harmful, since the coastline streets have been already hit by waves.

In order to improve the welfare of local users, the construction of detached breakwaters is a possible solution. Segmented breakwaters allow the creation of a calm water area by breaking the waves, and promoting the formation of a salient or a tombolo, enriching the local beaches conditions.

The structure should be designed in order to minimize the negative impacts. To reach that goal, the length of the structure and the crest height should be thought carefully. One of the main concerns the designer must have in mind is the water circulation. In this project two segments were designed to ensure water circulation and reasonable dimensions for both segments.

For the design of the detached breakwaters were used several methods for both hydraulic and structural parameters. For the hydraulic design two aspects were studied by empirical formulation, the wave transmission and the prediction of formation of salients and tombolos, such as Briganti *et al.* (2003) for the first, and Daily and Pope (1986), Pilarczyk (2003) and Suh e Dalrymple (1987) for the second. The JMC method allowed the selection of the best location and the dimensions of the two structures. Using the formulas of Ming and Chiew (2000) the dimensions of the salient were calculated. With respect to the structural design, the formulations of Hudson (1974), van der Meer (1988), Powell e Allsop (1985) and Vidal *et al.* (2001) were used, in order to get a diversity of results.

Given the results of our study, the solution is thought to conciliate the desired protection and the minimum impacts.

**KEYWORDS:** Coast Protection, Detached Breakwaters, Foz do Porto, Douro River.



## ÍNDICE GERAL

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> ..... | i   |
| <b>RESUMO</b> .....         | iii |
| <b>ABSTRACT</b> .....       | v   |

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> ..... | 1 |
|----------------------------|---|

|                                                                               |   |
|-------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>2. OS QUEBRAMARES DESTACADOS COMO ELEMENTO DE PROTECÇÃO COSTEIRA</b> ..... | 3 |
|-------------------------------------------------------------------------------|---|

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>2.1. INTRODUÇÃO</b> .....             | 3  |
| <b>2.2. PROTECÇÃO COSTEIRA</b> .....     | 3  |
| <b>2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS</b> ..... | 6  |
| 2.3.1. PERFIL TRANSVERSAL .....          | 7  |
| 2.3.2. MATERIAIS UTILIZADOS .....        | 8  |
| 2.3.3. PARÂMETROS DE CÁLCULO .....       | 8  |
| 2.3.4. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO .....    | 10 |
| 2.3.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS .....    | 12 |
| 2.3.5.1. Impactes hidrodinâmicos .....   | 12 |
| 2.3.5.2. Impactes biomorfológicos .....  | 12 |
| 2.3.5.3. Impactes paisagísticos .....    | 13 |
| 2.3.5.4. Impactes socioeconómicos .....  | 13 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3. DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICO E ESTRUTURAL DE QUEBRAMARES DESTACADOS</b> ..... | 15 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3.1. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO</b> .....                       | 15 |
| 3.1.1. TRANSMISSÃO DA AGITAÇÃO .....                               | 15 |
| 3.1.2. ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS .....                               | 18 |
| 3.1.2.1. Forma de equilíbrio estático a sotamar da estrutura ..... | 21 |
| 3.1.2.2. Japanese Ministry of Construction (JMC) .....             | 25 |
| <b>3.2. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL</b> .....                       | 28 |
| 3.2.1. FÓRMULA DE HUDSON (WES) .....                               | 29 |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2. FÓRMULA DE VAN DER MEER .....        | 31        |
| 3.2.3. FÓRMULA DE POWELL E ALLSOP .....     | 33        |
| 3.2.4. FÓRMULA DE VIDAL <i>ET AL.</i> ..... | 34        |
| <b>3.3. PERFIL TRANSVERSAL TIPO .....</b>   | <b>37</b> |
| 3.3.1. CAMADAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL .....  | 37        |
| 3.3.2. FUNDAÇÃO .....                       | 39        |

## **4. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO: FRENT MARÍTIMA DA FOZ DO DOURO NO PORTO .....**

41

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE INTERVENÇÃO .....</b>      | <b>41</b> |
| 4.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....                                       | 41        |
| 4.1.2. AS PRAIAS DA CIDADE DO PORTO .....                                  | 43        |
| <b>4.2. CARACTERÍSTICAS E CONDICIONANTES DO LOCAL DE INTERVENÇÃO .....</b> | <b>44</b> |
| 4.2.1. ALTURA DE ONDA .....                                                | 45        |
| 4.2.2. PERÍODOS DE ONDA .....                                              | 47        |
| <b>4.3. GEO-MORFOLOGIA DA COSTA .....</b>                                  | <b>48</b> |
| 4.3.1. TOPOGRAFIA E BATIMETRIA .....                                       | 48        |
| 4.3.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS .....                                    | 49        |
| <b>4.4. SOLUÇÕES E MEDIDAS .....</b>                                       | <b>50</b> |

## **5. MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA DO PROJECTO .....**

53

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>                                        | <b>53</b> |
| <b>5.2. ELEMENTOS DE BASE DE CÁLCULO .....</b>                                | <b>53</b> |
| 5.2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....                | 53        |
| 5.2.2. CARACTERÍSTICAS DA AGITAÇÃO .....                                      | 54        |
| <b>5.3. DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA .....</b>                                     | <b>54</b> |
| <b>5.4. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL .....</b>                                        | <b>55</b> |
| 5.4.1. INTRODUÇÃO .....                                                       | 55        |
| 5.4.2. PESOS UNITÁRIOS DOS BLOCOS DO MANTO RESISTENTE – PERFIL CORRENTE ..... | 56        |
| 5.4.2.1. Dimensionamento pela fórmula de Hudson .....                         | 56        |
| 5.4.2.2 Dimensionamento pela fórmula de van der Meer .....                    | 56        |
| 5.4.2.3. Dimensionamento pela fórmula de Powell e Allsop .....                | 57        |

|                                                                                |        |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 5.4.2.4. Dimensionamento pela fórmula de Vidal <i>et al.</i> .....             | 58     |
| 5.4.3. PESOS UNITÁRIOS DOS BLOCOS DO MANTO RESISTENTE – PERFIL DA CABEÇA ..... | 59     |
| 5.4.4. FACTOR DE REDUÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DOS BLOCOS, $R_p$ .....             | 60     |
| 5.4.5. PESOS UNITÁRIOS DOS ELEMENTOS .....                                     | 61     |
| <b>5.5. CONCEPÇÃO HIDRÁULICA</b> .....                                         | 62     |
| 5.5.1. INTRODUÇÃO .....                                                        | 62     |
| 5.5.2. ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS .....                                           | 62     |
| 5.5.2.1. Método do JMC .....                                                   | 62     |
| 5.5.2.2. Coeficiente de transmissão .....                                      | 63     |
| 5.5.2.3. Métodos empíricos .....                                               | 66     |
| 5.5.2.4. Forma da praia a sotamar da estrutura .....                           | 68     |
| <b>5.6. MÉTODO CONSTRUTIVO</b> .....                                           | 71     |
| <b>5.7. MAPA DE QUANTIDADES E MEDIÇÕES</b> .....                               | 73     |
| <br><b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                                       | <br>75 |
| <br><b>7. PEÇAS DESENHADAS</b> .....                                           | <br>77 |
| <br><b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                                  | <br>85 |
| <br><b>ANEXOS</b>                                                              |        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig.2.1 – Possíveis soluções de defesa costeira, figuras 2.2 a 2.7. ....                                                                                                                                                                                                                             | 4  |
| Fig.2.2 – Sistema de esporões, Carolina do Norte, EUA ( <a href="http://dcm2.enr.state.nc.us">http://dcm2.enr.state.nc.us</a> ).....                                                                                                                                                                 | 4  |
| Fig.2.3 – Molhe norte na barra do Rio Douro, Maio de 2009. ....                                                                                                                                                                                                                                      | 5  |
| Fig.2.4 – Obra longitudinal aderente na praia da Granja ( <a href="http://picasaweb.google.com/pauloach">http://picasaweb.google.com/pauloach</a> ). ....                                                                                                                                            | 5  |
| Fig.2.5 – Quebramar destacado da Aguda no final da construção e após formação do tómbolo.<br>(Instituto da Água, 2002, <a href="http://www.panoramio.com">www.panoramio.com</a> ). ....                                                                                                              | 5  |
| Fig.2.6 – Reserva natural de dunas de S. Jacinto ( <a href="http://olhares.aeiou.pt">http://olhares.aeiou.pt</a> ). ....                                                                                                                                                                             | 6  |
| Fig.2.7 – Alimentação artificial da praia da Granja ( <a href="http://rosamarmore.blogspot.com">http://rosamarmore.blogspot.com</a> ). ....                                                                                                                                                          | 6  |
| Fig.2.8 – Plano geral de obras propostas entre Miramar e Espinho, Mota Oliveira (1991). ....                                                                                                                                                                                                         | 7  |
| Fig.2.9 – Perfil transversal-tipo de um quebramar destacado (adaptado de US Army Corps of<br>Engineers, 2006). ....                                                                                                                                                                                  | 8  |
| Fig. 2.10 – Parâmetros de cálculo em planta. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 9  |
| Fig. 2.11 – Parâmetros de cálculo em perfil. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 9  |
| Fig. 2.12 – Casos distintos de dupla saliência. ....                                                                                                                                                                                                                                                 | 10 |
| Fig.2.13 – Configurações típicas de praias com quebramares destacados (adaptado de<br><a href="http://www.encora.eu/coastalwiki">http://www.encora.eu/coastalwiki</a> ) ....                                                                                                                         | 11 |
| Fig. 2.14 – Tipos de quebramares consoante a sua localização. (adaptado de<br><a href="http://www.encora.eu/coastalwiki">http://www.encora.eu/coastalwiki</a> ). ....                                                                                                                                | 11 |
| Fig 3.1 – Definição esquemática dos parâmetros. ....                                                                                                                                                                                                                                                 | 20 |
| Fig. 3.2 – Efeito de um quebramar destacado sobre a linha de costa, Pope e Dean, 1986<br>(adaptado de Pilarczyk e Zeidler, 1996). ....                                                                                                                                                               | 21 |
| Fig. 3.3 – Esquema representativo das diferentes variáveis (adaptado de Burcharth et al., 2007). ....                                                                                                                                                                                                | 22 |
| Fig. 3.4 – Definição esquemática de um tómbolo (González e Medina, 2001). ....                                                                                                                                                                                                                       | 22 |
| Fig. 3.5 – Definição esquemática de uma saliência teórica (González e Medina, 2001). ....                                                                                                                                                                                                            | 23 |
| Fig. 3.6 – Variação dos parâmetros adimensionais da forma em planta de equilíbrio para tómbolo,<br>saliência e dupla saliência para diferentes valores do comprimento do quebramar 2B, da distância<br>do quebramar à linha de costa, Y, e do comprimento de onda, L (Gonzalez e Medina, 2001). .... | 23 |
| Fig. 3.7 - Definição esquemática de uma saliência teórica - linha tracejado - e real - linha contínua<br>(González e Medina, 2001). ....                                                                                                                                                             | 24 |
| Fig. 3.8 - Relação entre as formas de saliência teórica e real (adaptado de Burcharth et al., 2007). ...                                                                                                                                                                                             | 24 |
| Fig. 3.9- Definição esquemática de saliência dupla teórica (González e Medina, 2001). ....                                                                                                                                                                                                           | 25 |
| Fig. 3.10 – Tipo de praia B e C segundo o método JMC, JMC (adaptado de Rosati e Truitt, 1990). ....                                                                                                                                                                                                  | 26 |
| Fig.3.11 – Declividade em águas profundas versus declividade junto à costa, para várias<br>inclinações médias do talude de praia, Goda, 1970 (Herbich, 1999). ....                                                                                                                                   | 26 |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.12 - Relação entre SAR e alguns parâmetros locais para praias do tipo B, JMC (Rosati e Truitt, 1990). .....                                                               | 27 |
| Fig. 3.13 - Relação entre SAR e alguns parâmetros locais para praias do tipo C, JMC (Rosati e Truitt, 1990). .....                                                               | 27 |
| Fig. 3.14 - Factor de permeabilidade, P, para vários tipos de situações, van der Meer, 1988 (Taveira Pinto, 2003). .....                                                         | 31 |
| Fig.3.15 – Secções consideradas no dimensionamento de um quebramar de baixa cota de coroamento, Vidal et al., 2000 (Pereira 2008). .....                                         | 35 |
| Fig. 3.16 – Relações de estabilidade para o dimensionamento das diferentes zonas de um quebramar destacado de baixa cota de coroamento, Vidal et al., 2000 (Pereira 2008). ..... | 36 |
| Fig.3.17 – Secção transversal de um quebramar de taludes (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2006). .....                                                                   | 38 |
| Fig. 4.1 – Estrada de Carreiros ( <a href="http://www.jf-nevogilde.pt/">http://www.jf-nevogilde.pt/</a> ). .....                                                                 | 42 |
| Fig. 4.2 – Avenida do Brasil, Pérgola ( <a href="http://diasquevoam.blogspot.com/">http://diasquevoam.blogspot.com/</a> ). .....                                                 | 42 |
| Fig. 4.3 – Localização de alguns pontos de interesse na frente marítima da Foz do rio Douro.....                                                                                 | 43 |
| Fig.4.4 – Molhe de Carreiros, 2009.....                                                                                                                                          | 44 |
| Fig.4.5 – Praia dos Ingleses antes da elevação da cota da estrada ( <a href="http://jf-fozdodouro.pt/">http://jf-fozdodouro.pt/</a> ). .....                                     | 44 |
| Fig.4.6 - Praia dos Ingleses ( <a href="http://portodocrime.blogspot.com">http://portodocrime.blogspot.com</a> ) .....                                                           | 44 |
| Fig. 4.7 – Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (Pereira, 2008).....                                                                                   | 47 |
| Fig. 4.8 – Exemplos de perfis de praia .....                                                                                                                                     | 48 |
| Fig. 4.9 – Mapa geológico do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Silva e Flores, 2002). .....                                                                                  | 50 |
| Fig 4.10 – Praia de Gondarém, 6 de Março de 2009, .....                                                                                                                          | 51 |
| Fig 4.11 – Praia dos Ingleses, 6 de Março de 2009.....                                                                                                                           | 51 |
| Fig 4.12 – Praia dos Ingleses, 27 de Maio de 2009.....                                                                                                                           | 51 |
| Fig. 4.13 – Pormenor da praia dos Ingleses, 6 de Março de 2009.....                                                                                                              | 52 |
| Fig. 4.14 – Pormenor da praia dos Ingleses, 27 de Maio de 2009. ....                                                                                                             | 52 |
| Fig. 5.1 – Saliências após a alimentação artificial das praias.....                                                                                                              | 71 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 3.1 – Resumo das condições para formação de saliências e tómbolos ( $L_s$ – comprimento da estrutura; $X$ – distância à linha de costa inicial; $L_g$ – abertura entre segmentos; $K_t$ – coeficiente de transmissão; $H_0$ – altura de onda para grandes profundidades; $d$ – profundidade local). ..... | 19 |
| Quadro 3.2 – Dimensão das saliências, Black e Andrews (2001). .....                                                                                                                                                                                                                                              | 20 |
| Quadro 3.3 – Intervalos para o comprimento do quebramar e espaçamento entre quebramares consecutivos. ....                                                                                                                                                                                                       | 28 |
| Quadro 3.4 – Coeficientes $K_D$ da fórmula de Hudson para enrocamento (US Army Corps of Engineers, 1984). ....                                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Quadro 3.5 – Coeficientes $K_D$ da fórmula de Hudson para enrocamento, LNEC. ....                                                                                                                                                                                                                                | 30 |
| Quadro 3.6 – Valores do parâmetro $S$ recomendáveis, para mantos resistentes constituídos por duas camadas de enrocamento, van der Meer, 1988 (Taveira Pinto, 2003). ....                                                                                                                                        | 32 |
| Quadro 3.7 – Parâmetros $A$ e $B$ para a expressão 3.34, para agitação irregular .....                                                                                                                                                                                                                           | 34 |
| Quadro 3.8 – Constantes $A$ , $B$ e $C$ a considerar nas curvas de estragos (Pereira, 2008). ....                                                                                                                                                                                                                | 35 |
| Quadro 4.1 – Elementos relativos às marés (Pereira, 2008). ....                                                                                                                                                                                                                                                  | 45 |
| Quadro 4.2 – Valores das alturas de onda características (Pereira, 2008). ....                                                                                                                                                                                                                                   | 46 |
| Quadro 4.3 – Valores das alturas de onda características (Silva, 2008). ....                                                                                                                                                                                                                                     | 46 |
| Quadro 4.4 – Períodos de onda (Pereira, 2008). ....                                                                                                                                                                                                                                                              | 47 |
| Quadro 4.5 – Inclinação média do talude de praia. ....                                                                                                                                                                                                                                                           | 49 |
| Quadro 4.6 – Definição de alguns parâmetros estruturais para as várias hipóteses estudadas. ....                                                                                                                                                                                                                 | 52 |
| Quadro 5.1 – Coeficientes $K_D$ da fórmula de Hudson para enrocamento utilizados, segundo indicações do LNEC. ....                                                                                                                                                                                               | 53 |
| Quadro 5.2 – Altura de onda máxima compatível com a profundidade, altura de onda significativa e altura de onda média do décimo superior, para a profundidade de -5,0m (ZH). ....                                                                                                                                | 54 |
| Quadro 5.3 – Peso unitário, $W_{Hudson}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ . ....                                                                                                                                                                                                                                     | 56 |
| Quadro 5.4 – Peso unitário, $W_{van\ der\ Meer}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ . ....                                                                                                                                                                                                                             | 56 |
| Quadro 5.5 – Peso unitário, $W_{van\ der\ Meer}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ , para a cota de +3,5m (ZH). ....                                                                                                                                                                                                  | 57 |
| Quadro 5.6 – Peso unitário, $W_{van\ der\ Meer}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ , para a cota de +4,0m (ZH). ....                                                                                                                                                                                                  | 57 |
| Quadro 5.7 – Parâmetros intervenientes na equação 3.29. ....                                                                                                                                                                                                                                                     | 57 |
| Quadro 5.8 – Peso unitário, $W_{Powell\ e\ Allsop}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ . ....                                                                                                                                                                                                                          | 57 |
| Quadro 5.9 – Parâmetros intervenientes na equação 3.34. ....                                                                                                                                                                                                                                                     | 58 |
| Quadro 5.10 – Peso unitário, $W_{Powell\ e\ Allsop}$ , e diâmetro médio $D_{n50}$ . ....                                                                                                                                                                                                                         | 58 |
| Quadro 5.11- Pesos unitários e respectivos diâmetros para quebramares não galgáveis para a aplicação do método Vidal <i>et al.</i> ....                                                                                                                                                                          | 58 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 5.12 – Diâmetro médio dos blocos para cada secção, para uma cota de coroamento de +3,5m (ZH).                                                                     | 59 |
| Quadro 5.13 – Diâmetro médio dos blocos para cada secção, para uma cota de coroamento de +4,0m (ZH).                                                                     | 59 |
| Quadro 5.14 – Pesos unitários de Hudson e van der Meer para as secções corrente e da cabeça, e respectivos diâmetros médios.                                             | 60 |
| Quadro 5.15 – Pesos unitários de Hudson e van der Meer para as secções corrente e da cabeça, e respectivos diâmetros médios, após aplicação do factor de redução $R_p$ . | 60 |
| Quadro 5.16- Pesos unitários dos blocos do manto resistente.                                                                                                             | 61 |
| Quadro 5.17 – Resultados do método JMC para as várias profundidades.                                                                                                     | 63 |
| Quadro 5.18 – Coeficiente de transmissão por Taveira Pinto para $z_c=+3,5m$ (ZH).                                                                                        | 64 |
| Quadro 5.19 – Coeficiente de transmissão por Taveira Pinto para $z_c=+4,0m$ (ZH).                                                                                        | 64 |
| Quadro 5.20 – Coeficientes de transmissão para $z_c=+3,5m$ (ZH).                                                                                                         | 65 |
| Quadro 5.21 – Coeficientes de transmissão para $z_c=+4,0m$ (ZH).                                                                                                         | 65 |
| Quadro 5.22 – Parâmetros intervenientes nos métodos empíricos.                                                                                                           | 66 |
| Quadro 5.23 – Resposta da linha de costa para $z_c=+4,0m$ (ZH) e $X=400m$ .                                                                                              | 67 |
| Quadro 5.24 – Resposta da linha de costa para $z_c=+4,0m$ (ZH) e $X=300m$ .                                                                                              | 67 |
| Quadro 5.25 – Respostas da linha de costa para as diferentes cotas de coroamento e distâncias à linha de costa.                                                          | 68 |
| Quadro 5.26 – Características da saliência, Black e Andrews (2001).                                                                                                      | 69 |
| Quadro 5.27 – Parâmetros de cálculo para a forma de equilíbrio estático a sotamar da estrutura.                                                                          | 69 |
| Quadro 5.28 – Características geométricas do tómbolo.                                                                                                                    | 69 |
| Quadro 5.29 – Comprimento de praia afectado com base em resultados de González e Medina e Ming e Chiew.                                                                  | 70 |
| Quadro 5.30 – Comprimento de praia afectado com base em resultados de Black e Andrews e Ming e Chiew.                                                                    | 70 |
| Quadro 5.31 – Classes e volumes relativos ao manto resistente.                                                                                                           | 73 |
| Quadro 5.32 – Classes e volumes relativos à subcamada.                                                                                                                   | 73 |
| Quadro 5.33 – Classes e volumes relativos à risberma.                                                                                                                    | 74 |
| Quadro 5.34 – Volumes totais por classe.                                                                                                                                 | 74 |

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$(K_t)_{\text{através}}$  – coeficiente de transmissão através da estrutura

$(K_t)_{\text{sobre}}$  – coeficiente de transmissão sobre a estrutura

A – área da saliência em planta ( $\text{m}^2$ )

A – constante das curvas de nível de estragos, para Vidal *et al.*

A – parâmetro característico da curva de Powell e Allsop

a – parâmetro de cálculo de  $K_t$ , pela fórmula de van der Meer e Daemen

$A_t$  – área da secção transversal ( $\text{m}^2$ )

B – constante das curvas de nível de estragos, para Vidal *et al.*

b – largura do coroamento (m)

B – largura do coroamento para a fórmula de van der Meer e Daemen (m)

B – metade do comprimento do quebramar destacado (m)

B – parâmetro característico da curva de Powell e Allsop

b – parâmetro de cálculo de  $K_t$ , pela fórmula de van der Meer e Daemen

B1 – metade do comprimento de praia alterado pela formação de tómbolo ou saliência, para a metodologia de González e Medina (m)

BH – cabeça posterior do quebramar destacado, para Vida *et. al*

$B_k$  – metade da largura de ligação do tómbolo ao quebramar destacado (m)

BS – talude posterior do quebramar destacado, para Vida *et. al*

C – constante das curvas de nível de estragos, para Vidal *et al*

C – coroamento do quebramar destacado, para Vida *et. al*

C – ponto de referência no quebramar destacado, para Hsu e Evans

d – profundidade (m)

$D_{\infty 1}$  – diâmetro médio dos blocos do talude com inclinação 2:1, para um quebramar não galgável (m)

$D_{\infty 2}$  – diâmetro médio dos blocos do talude com inclinação 3:2, para um quebramar não galgável (m)

$d_{b5}$  – profundidade de rebentação para o método JMC (m)

$D_{BH}$  – diâmetro médio dos blocos da cabeça posterior (m)

$D_{BS}$  – diâmetro médio dos blocos do talude posterior (m)

$D_C$  – diâmetro médio dos blocos do coroamento (m)

$D_{FH}$  – diâmetro médio dos blocos da cabeça anterior (m)

$D_{FS1}$  – diâmetro médio dos blocos do talude anterior com inclinação 2:1, para um quebramar galgável (m)

- $D_{FS2}$  – diâmetro médio dos blocos do talude anterior com inclinação 3:2, para um quebramar galgável (m)
- $D_{H\infty}$  – diâmetro médio dos blocos da secção de cabeça com inclinação 2:1, para um quebramar não galgável (m)
- $D_{n50}$  – diâmetro nominal dos blocos, diâmetro médio (m)
- $D_{tot}$  – comprimento de praia alterado, para as fórmulas de Black e Andrews (m)
- $e$  – dimensão característica dos blocos (m)
- $f_{sobre}^*$  – parâmetro de cálculo de  $(Kt)_{sobre}$  para uma estrutura submersa
- $f_{através}$  – parâmetro de cálculo de  $(Kt)_{através}$
- $F_d$  – altura adimensional de água acima do coroamento para Vida *et. al*
- $F_{d1}$  – altura adimensional da água acima do coroamento, correspondente ao talude anterior com inclinação 2:1
- $F_{d2}$  – altura adimensional da água acima do coroamento, correspondente ao talude anterior com inclinação 3:2
- $F_{d3}$  – altura adimensional da água acima do coroamento, correspondente ao coroamento
- $F_{d4}$  – altura adimensional da água acima do coroamento, correspondente à secção de cabeça
- FH – cabeça anterior do quebramar destacado, para Vida *et. al*
- FS – talude anterior do quebramar destacado, para Vida *et. al*
- $f_{sobre}$  – parâmetro de cálculo de  $(Kt)_{sobre}$
- $g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
- $H$  – altura de onda (m)
- $h_c$  – altura do quebramar destacado (m)
- $H_i$  – altura de onda incidente (m)
- $H_{m0}$  – altura de onda significativa (m)
- $H_o$  – altura de onda para grandes profundidades (m)
- $H_{012}$  – altura de onda excedida 12h/ano (m)
- $H_{05}$  – altura de onda média das cinco mais altas ondas em águas profundas (m)
- $H_{proj}$  – altura de onda de projecto (m)
- $H_r$  – altura de onda relativa (m)
- $H_{rms}$  – altura de onda média quadrática (m)
- $H_s$  – altura de onda significativa (m)
- $H_{s,0}$  – altura de onda significativa ao largo (m)
- $H_{s50}$  – altura de onda mediana (m)
- $\bar{H}_{1/10}$  – altura de onda média do décimo superior (m)
- $i_1$  – inclinação média do talude de praia submerso menos profundo

- $i_2$  – inclinação média do talude de praia submerso de profundidade média
- $i_3$  – inclinação média do talude de praia submerso mais profundo
- $I_s$  – resposta da linha de costa
- $K_D$  – coeficiente de estabilidade
- $K_t$  – coeficiente de transmissão
- $K_{tu}$  – limite superior para o coeficiente de transmissão por Briganti *et al.*
- $K_\Delta$  – coeficiente de forma
- $L_5$  – comprimento de onda junto da estrutura para a onda de altura  $H_{05}$  (m)
- $L_g$  – espaçamento entre quebramares destacados (m)
- $L_o$  – comprimento de onda em grandes profundidades (m)
- $L_{05}$  – comprimento da onda de altura  $H_{05}$  (m)
- $L_p$  – comprimento de praia a proteger (m)
- $L_s$  – comprimento longitudinal do quebramar destacado (m)
- $L_s^*$  – comprimento adimensionalizado referente à distância à linha de costa
- $N_a$  – número total de unidades existentes no manto resistente
- $N_e$  – número de unidades deslocadas da posição original
- $N_{PMAV}$  – nível de água em preia-mar de águas vivas, +4,0m (ZH)
- $N_s$  – nível de estragos para as fórmulas de Vidal *et al*
- $N_s$  – parâmetro de altura de onda adimensional
- $N_s^*$  – parâmetro de estabilidade espectral
- $N_s^{2,5\%}$  – parâmetro de altura de onda adimensional para um nível de estragos de 2,5%
- $N_s^{5\%}$  – parâmetro de altura de onda adimensional para um nível de estragos de 5%
- $N_{sBH}$  – número de estabilidade associado à secção da cabeça posterior
- $N_{sC}$  – número de estabilidade associado à secção do coroamento
- $N_{sFS}$  – número de estabilidade associado à secção do talude anterior
- NW – direcção noroeste
- $N_z$  – número de ondas
- $p$  – largura da base do modelo do quebramar no modelo de Taveira Pinto (m)
- $P$  – porosidade
- $p$  - probabilidade
- $P_0$  – ponto a partir do qual a praia não é afectada pela presença do quebramar destacado
- $P_c$  – ponto localizado na parábola de Hsu e Evans
- $R^*$  - coeficiente adimensional de transmissibilidade para a fórmula de Taveira Pinto

$R_0$  – distância entre  $P_0$  e C (m)

$R_c$  – desnível entre a cota de coroamento e o nível de água considerado (m)

$R_p$  – factor de redução

$R_p^*$  – parâmetro de cálculo do factor de redução

s - declividade

S – nível de estragos

SAR – quociente de área de saliência

SE – orientação sudeste

$s_{op}$  - declividade da onda em águas profundas

$s_{op}$  – declividade da onda ao largo

T – período de onda (s)

$T_{02}$  – período de onda médio (s)

THTP – direcção média do período de pico ( $^\circ$ )

$T_{012}$  – período de onda correspondente à altura de onda excedida 12h/ano (s)

$T_{05}$  – período de onda correspondente à altura de onda média das cinco mais altas ondas em águas profundas (s)

$T_p$  – período de pico (s)

TS – secção corrente do quebramar destacado, para Vida *et. al*

W – peso unitário dos blocos (kN)

$W_{Hudson}$  – peso unitário dos blocos do manto resistente resultante da formulação de Hudson (kN)

WNW – direcção oés-noroeste

$W_{van\ der\ Meer}$  – peso unitário dos blocos do manto resistente resultante da formulação de van der Meer (kN)

$W_{Vidal\ et\ al}$  – peso unitário dos blocos do manto resistente resultante da formulação de Vidal *et al.* (kN)

X – distância do quebramar destacado à linha de costa original (m)

X – parâmetro de cálculo para a metodologia de González e Medina

$X^*$  – distância adimensionalizada referente às larguras de rebentação e espraçamento

$X'$  – estimativa da distância do quebramar à linha de costa, para o método JMC (m)

$X'_s$  – largura da saliência para quando o quebramar se encontra à distância  $X'$  (m)

$X_{80}$  – largura da zona de rebentação e espraçamento onde se verifica aproximadamente 80% do transporte longitudinal (m)

$X_{off}$  – distância da extremidade da saliência ao quebramar destacado, para as fórmulas de Black e Andrews (m)

$X_s$  – largura da saliência (m)

Y – distância à linha de costa original para Hsu e Evans e González e Medina (m)

$Y'$  – distância da saliência ao quebra-mar destacado (m)  
 $Y_0$  – largura da saliência teórica, para a metodologia de González e Medina (m)  
 $Y_2$  – largura da saliência junto ao quebra-mar para o caso de dupla saliência (m)  
 $Y_{off}$  – largura da saliência, para as fórmulas de Black e Andrews (m)  
 $Y_s$  – largura da saliência real (m)  
 $\alpha$  - ângulo do talude com a horizontal, para a fórmula de Hudson ( $^\circ$ )  
 $\alpha_{min}$  – parâmetro de cálculo de Hsu e Evans ( $^\circ$ )  
 $\beta$  - parâmetro de cálculo de Hsu e Evans ( $^\circ$ )  
 $\beta_r$  - parâmetro de cálculo de Hsu e Evans ( $^\circ$ )  
 $\Delta$  – densidade relativa dos blocos  
 $\theta$  – ângulo do talude com a horizontal  
 $\theta_c$  - parâmetro de cálculo de Hsu e Evans  
 $\xi$  – parâmetro de Batjes  
 $\xi_m$  – número de Iribarren  
 $\xi_{mc}$  – valor crítico do número de Iribarren  
 $\sigma_s$  – desvio padrão  
 $\gamma_r$  – peso volúmico do material  
 $\gamma_w$  – peso volúmico da água

CEM – Coastal Engineering Manual  
CMFD – Complexo Metamórfico da Foz do Douro  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
JMC – Japanese Ministry of Construction  
IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos  
TOT – todo o tamanho  
ZH – Zero Hidrográfico  
SPM – Shore Protection Manual  
PMAV – preia-mar de águas vivas  
BMAV – baixa-mar de águas vivas





# 1

## INTRODUÇÃO

Em Portugal a região litoral tem sido alvo de grande procura, tanto para habitação, como para turismo e lazer, de tal modo que esta zona se desenvolveu mais do que o interior. Um factor determinante nessa procura é a proximidade às praias e ao mar.

Portugal dispõe de 1230km de costa só em Portugal continental, sendo por isso de interesse nacional a manutenção da mesma. Para isso é necessária uma boa gestão, incluindo uma avaliação dos problemas em cada local, tendo sempre em atenção que todos os casos diferem entre si. Existem alguns aspectos que não podem ser dissociados do modelo de gestão, entre os quais é de referir o turismo, a economia, a história local. Se por um lado se procura requalificar zonas às quais tem sido dada menor atenção, por outro é importante manter aquelas que ao longo do tempo têm sido consideradas como solucionadas.

A frente marítima da cidade do Porto sempre foi local de lazer, sendo as suas praias muito frequentadas na época balnear. Estas nunca foram alvo de nenhuma intervenção notória, uma vez que as intervenções que foram decorrendo procuravam sempre a melhoria da barra do Rio Douro ou a consolidação da zona urbana.

Observando os registos dos últimos anos, não tem havido problemas de maior no local em análise, a Foz do Porto, mas se se recuar um pouco mais é possível recordar invernos muito rigorosos no local. Na Foz do Porto não se verificam problemas de erosão, nem de grande avanço do mar, porém durante esses invernos rigorosos tem-se verificado a ocorrência de alguns galgamentos.

Uma possível intervenção, para melhorar não só as condições balneares como aumentar a segurança face à agitação marítima, poderá passar pela construção de um quebramar destacado, aumentando o volume de areia nas praias rochosas e diminuindo a energia das ondas que atingem a costa. Com o intuito de encontrar uma solução para a frente marítima da Foz do Porto, neste trabalho foi desenvolvido um projecto de um sistema de quebramares destacados.

No capítulo 2 é efectuada uma pequena apresentação das possíveis soluções de protecção costeira, na qual são apresentadas com algum pormenor as principais características de um quebramar destacado e o seu funcionamento.

De seguida, no capítulo 3 são apresentadas, ainda que brevemente, as metodologias de carácter estrutural e hidráulico adoptadas para o desenvolvimento do projecto em causa. Foram utilizados vários métodos empíricos, que têm sido desenvolvidos com base em estudos de diferentes origens e

com diferentes objectivos, permitindo uma análise criteriosa e um conhecimento mais vasto no que à acção da agitação diz respeito.

O capítulo 4 contém uma apresentação simples da zona de intervenção. Inicia-se com um pequeno enquadramento histórico do local, para apresentação da região e também uma caracterização da agitação marítima. Foram ainda contemplados alguns aspectos próprios das praias locais, como por exemplo a constituição das rochas.

O capítulo 5 contém a descrição da solução seleccionada, tendo esta sido desenvolvida com base a metodologias apresentadas nos capítulos 3 e 4. No início desse capítulo encontram-se as características da opção encontrada e depois uma memória justificativa das opções tomadas ao longo do projecto.

Por fim, apresenta-se, de forma breve, uma possível solução para a fase de construção e as peças desenhadas relativas à obra principal.

Durante a execução deste trabalho foram utilizadas várias ferramentas informáticas, nomeadamente programas como Autocad, para execução de desenhos e esquemas, a plataforma ArcGIS, para tratamento dos dados relativos à batimetria, e MO Excel, tendo sido adaptadas ao projecto em questão folhas de cálculo realizadas por Pereira (2008) para o dimensionamento hidráulico e estrutural.

## 2

# OS QUEBRAMARES DESTACADOS COMO ELEMENTO DE PROTECÇÃO COSTEIRA

### 2.1. INTRODUÇÃO

O fenómeno da erosão tem sido visível numa parte significativa da costa portuguesa. Por esta razão têm sido desenvolvidos em Portugal ao longo dos anos vários projectos de protecção costeira. Ao longo das praias portuguesas é usual encontrar estruturas de protecção, seja para melhoramento seja para controlo da erosão. Entre estas várias hipóteses, a construção de quebramares destacados é uma das que tem sido estudada e utilizada em vários locais, não só em Portugal mas em todo o mundo. Estes permitem a atenuação da energia das ondas, criação de zonas abrigadas de agitação, quer para práticas balneares, como para a entrada de portos, alteração do transporte de sedimentos ao longo da costa, sendo mesmo possível o aumento da largura da praia protegida. Isto deve-se ao facto de se verificarem fenómenos de difracção e refracção e de haver menor energia nas ondas a sotamar da estrutura.

Em Portugal há uma grande dependência da qualidade das praias, pois delas dependem muitas das actividades de verão, tanto para habitantes como turistas, e também as vilas piscatórias existentes em toda a costa de Norte a Sul do país. Assim, é do maior interesse protegê-las para que mais turistas sejam atraídos, para que os habitantes possam desfrutar delas, e para que os comerciantes que se têm instalado no litoral sintam segurança. Para contribuir para a correcta utilização da orla costeira são importantes tanto os Planos de Ordenamento da Orla Costeira como também os Planos Directores Municipais que pretendem prevenir erros de utilização do litoral, não só em relação às praias mas também à faixa próxima, que por vezes é alvo de algum desleixo. Apesar de já existir alguma sensibilidade nesta área muitas vezes não é realizada nenhuma acção para prevenir a destruição causada por algumas tempestades, sendo necessário que os acidentes ocorram para que seja dada atenção àquela situação.

### 2.2. PROTECÇÃO COSTEIRA

Quando se torna necessário proteger uma praia pode-se fazê-lo de vários modos, tendo em atenção se se pretende uma protecção provisória para mais tarde ser reforçada ou se é uma obra com carácter mais definitivo. Naturalmente que nesta área não há soluções definitivas, já que a acção do mar é bastante imprevisível, quando muito é possível efectuar um plano de alguns anos e acompanhar a evolução da costa e da estrutura. Conforme o objectivo de defesa, a estrutura pode ser enraizada ou destacada, longitudinal ou transversal, a figura 2.1.

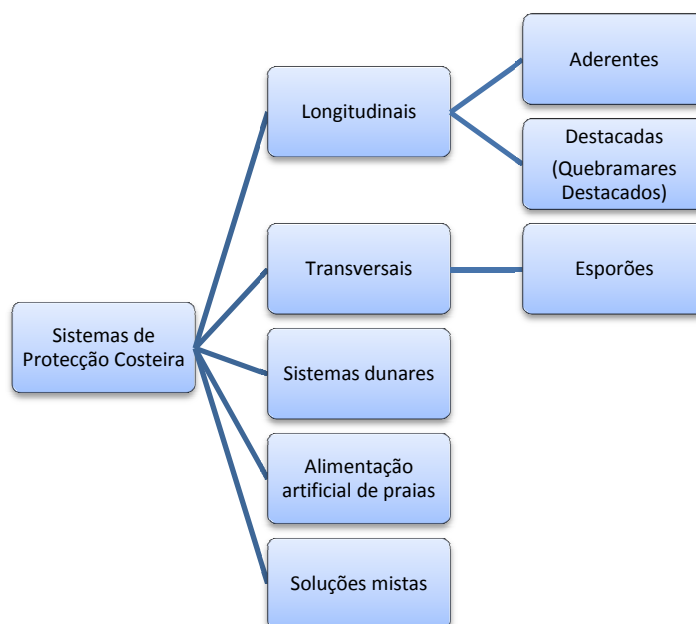


Fig.2.1 – Possíveis soluções de defesa costeira, figuras 2.2 a 2.7.

Em todo o mundo encontram-se facilmente obras transversais (esporões), figuras 2.3 e 2.4, para protecção de praias, portos e outros fins, o que tem provocado uma alteração do transporte de sedimentos ao longo das costas. Além disso, tem-se verificado recentemente, em Portugal, que devido à existência de obras de retenção nos rios, o transporte sedimentar nos leitos fluviais também já não se processa do mesmo modo. Ou seja, devido aos menores caudais existentes o rio flui com menor velocidade provocando menos erosão, logo transportando menos material. Também, muito do que é transportado fica retido a montante das barragens, e por isso as praias não têm recebido sedimentos para alimentar aqueles que são transportados pelas correntes longitudinais. Actualmente existe já uma preocupação para que, aquando da dragagem de portos e leitos fluviais, algum desse material seja usado na alimentação artificial de praias e não só vendido para as empresas de construção civil.



Fig.2.2 – Sistema de esporões, Carolina do Norte, EUA (<http://dcm2.enr.state.nc.us>).



Fig.2.3 – Molhe norte na barra do Rio Douro, Maio de 2009.



Fig.2.4 – Obra longitudinal aderente na praia da Granja (<http://picasaweb.google.com/pauloach>).



Fig.2.5 – Quebramar destacado da Aguda no final da construção e após formação do tómbolo (Instituto da Água, 2002; [www.panoramio.com](http://www.panoramio.com)).



Fig.2.6 – Reserva natural de dunas de S. Jacinto (<http://olhares.aeiou.pt>).

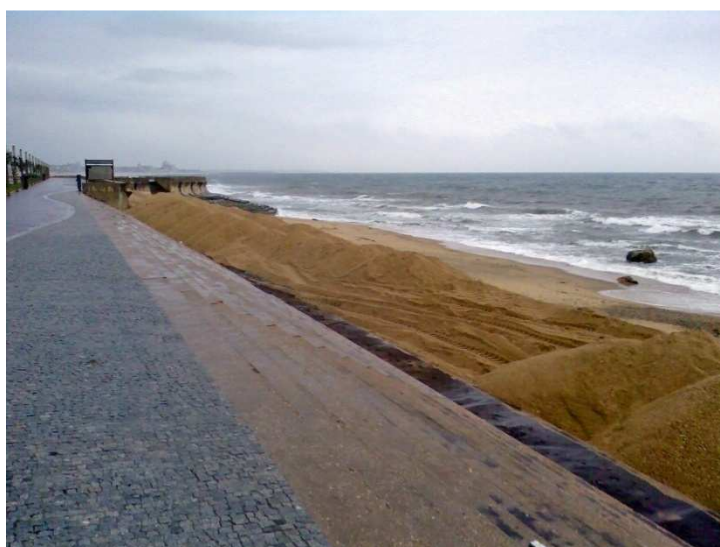


Fig.2.7 – Alimentação artificial da praia da Granja (<http://rosamarmore.blogspot.com>).

### **2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS**

Os quebramares destacados podem ser usados, como já foi referido, para protecção de praias, controlo de correntes, criar zonas de abrigo, como por exemplo portos de pesca, comerciais, e outros. Então, consoante o objectivo e as condições locais, estas estruturas são construídas emersas, submersas, paralelas ou não à linha de costa.

É fácil compreender que nem sempre o resultado da construção é o esperado, como se verificou na praia da Aguda em Vila Nova de Gaia com o assoreamento. Neste caso o objectivo era apenas de

proteger uma pequena área para garantir a actividade piscatória da localidade e não aumentar a largura da praia. Então, o facto de se ter formado um tómbolo dificultou a actividade dos pescadores e quebrou o transporte de sedimentos para a Granja, que tendo já problemas de erosão, ficou mais exposta à agitação pela falta de areia. Na verdade, o plano geral de 1981, figura 2.8, já previa a construção de obras de defesa costeira na Aguda e na Granja, entre outros, mas apenas as obras de Espinho foram realizadas. Por aí se percebe que, apesar de recentemente serem notórias algumas alterações, os problemas não são de agora mas já existiam anteriormente. Na verdade, a execução deste plano foi devido ao facto de na época começar a ser notória a retenção de alguns sedimentos nas barragens construídas no Rio Douro. Apesar de existirem alguns casos menos favoráveis, o desempenho destas obras tem sido geralmente eficaz.

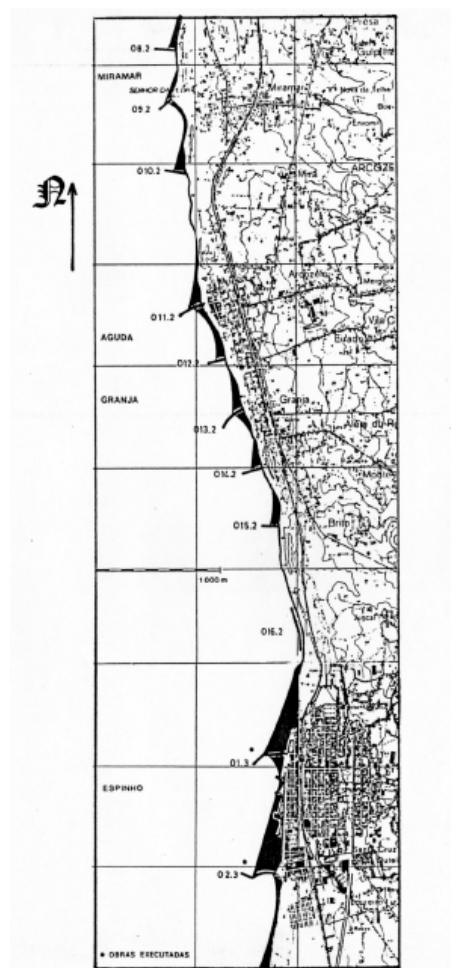


Fig.2.8 – Plano geral de obras propostas entre Miramar e Espinho (Hidrotécnica Portuguesa, 1981).

### 2.3.1. PERFIL TRANSVERSAL

Usualmente um quebramar destacado é constituído por alguns sectores com diferentes funções. Alguns estão mais preparados para resistir à agitação e outros para garantir alguma permeabilidade, figura 2.9. Os elementos mais comuns são:

- Manto Resistente – é a camada exterior constituída por blocos de enrocamento ou betão que está directamente exposta à agitação marítima;

- Filtros ou mantos intermédios – são camadas que efectuam a transição entre o manto resistente e o núcleo, com blocos de enrocamento de menor dimensão do que o primeiro, de modo que se verifique alguma porosidade e que não haja remoção do material do núcleo;
- Núcleo – zona interior do quebramar, normalmente constituída por enrocamento de “todo o tamanho” (TOT);
- Coroamento – conjunto dos pontos de cota máxima do quebramar, sendo determinante no comportamento da estrutura, inclusive na transmissibilidade;
- Risberma – prisma de fundação, localizado na base da estrutura, podendo nalguns casos reduzir as acções sobre a mesma.

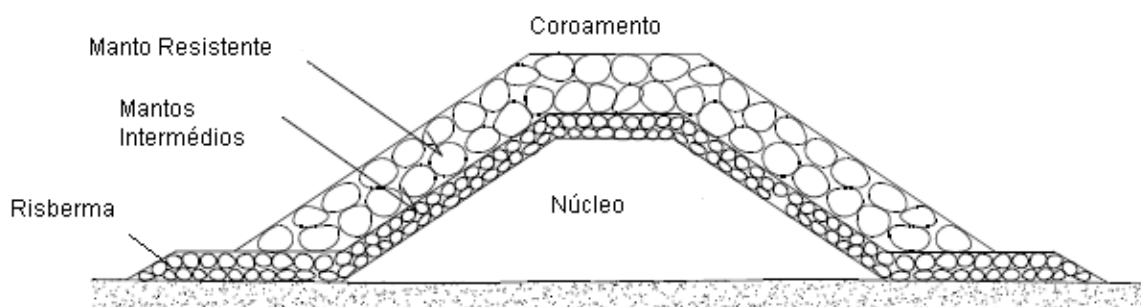


Fig.2.9 – Perfil transversal-tipo de um quebramar destacado (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2006)

### 2.3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

A qualidade da obra está directamente relacionada com o material utilizado, influenciando a durabilidade da estrutura.

Durante vários anos o material mais utilizado foi o enrocamento, existindo sempre a possibilidade de recorrer a blocos de betão, como blocos Antifer, tetrápodes, etc. No caso de se utilizar enrocamento este deverá ser de alguma qualidade, já que estará exposto directamente à agitação, tal como quando for usado betão deverá ser encontrado um equilíbrio entre o peso volúmico do mesmo e o tamanho do bloco. O uso de enrocamento é interessante, pelo facto de os impactes relacionados com a paisagem e com a fauna e flora locais serem menores, pois com o passar do tempo tomará um aspecto mais natural e poderá criar condições para a fixação de fauna e flora.

Com vista a criar uma solução económica é viável a utilização de geotêxteis para a fundação, de forma a materializar uma camada de separação e garantir a boa instalação dos blocos. Além disso é possível substituir a primeira camada dos filtros por um geotêxtil, efectuando a separação destes com o núcleo.

### 2.3.3. PARÂMETROS DE CÁLCULO

A forma da linha de costa após a construção de um quebramar destacado será influenciada por vários parâmetros que são tidos em conta no dimensionamento, e dependentes de um prévio conhecimento da região e do objectivo da intervenção, figuras 2.10 e 2.11.

A eficácia está dependente da transmissibilidade, do clima de agitação, do tipo de sedimentos transportados, tipo de praia, marés e ainda pelas características do quebramar, como o comprimento, o espaçamento entre quebramares adjacentes, distância à linha de costa e profundidade.

Assim no decurso do projecto deverão ser definidos os seguintes parâmetros.

- Altura,  $H$ , e período de onda,  $T$ ;
- Direcção de transporte e características dos sedimentos;
- Cota da fundação e do coroamento;
- Batimetria;
- Direcção e intensidade dos ventos;
- Comprimento longitudinal,  $L_s$ ;
- Espaçamento entre segmentos,  $L_g$ ;
- Distância à linha de costa,  $X$ ;
- Orientação geográfica.

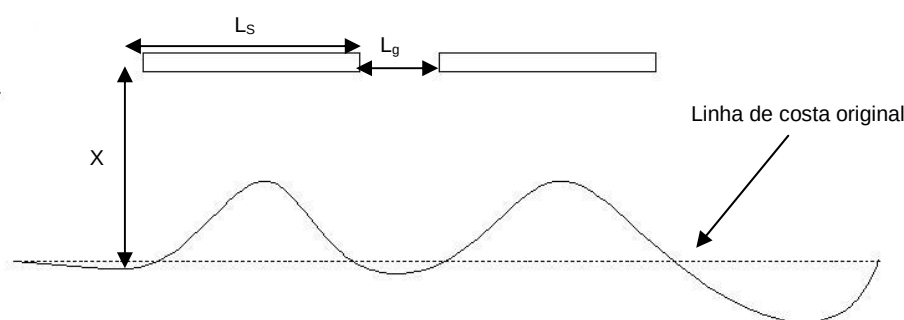


Fig. 2.10 – Parâmetros de cálculo em planta.

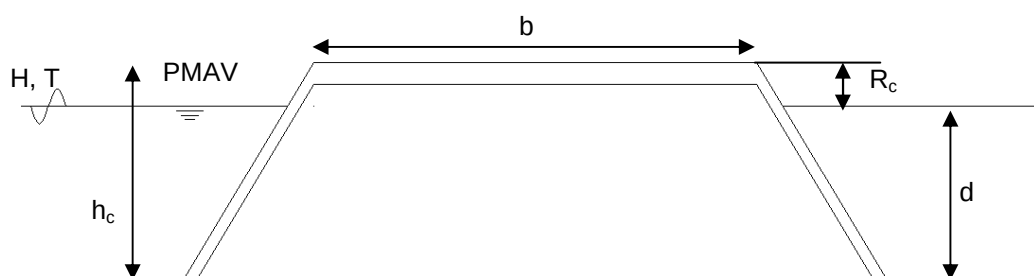


Fig. 2.11 – Parâmetros de cálculo em perfil.

Aquando da definição de alguns parâmetros, é importante escolher se se pretende uma estrutura emersa ou submersa. Conhecidos os níveis de maré no local, é possível escolher a cota de coroamento, definindo ao mesmo tempo a submergência da estrutura,  $R_c$ , isto é, a diferença entre a altura do quebramar,  $h_c$ , e o nível máximo de maré,  $N_{PMAV}$ . Assim, uma estrutura será submersa quando  $R_c < 0$ , e emersa quando  $R_c > 0$ . Este factor tem implicações não só a nível estrutural, mas também a nível hidráulico, porque dele dependem outros aspectos como os galgamentos, a transmissão de agitação através e sobre o quebramar, estando associados também a este último aspecto a permeabilidade do mesmo.

Nesta fase, além dos factores hidráulicos referidos, é importante ter em conta que a cota do coroamento terá também implicações paisagísticas locais, sendo necessário avaliar de que tipo de paisagem se trata e como se enquadrará a estrutura nessa mesma paisagem.

#### 2.3.4.FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

Como já tem sido referido, a construção de quebra-mares prevê um aumento da área de praia, principalmente do perímetro da mesma, já que é alterado o transporte sedimentar devido a existência da estrutura. Para se alcançar a configuração pretendida é necessário que haja um correcto dimensionamento, não esquecendo o contributo dos fenómenos de difracção, refracção e outros que levarão ao reajustamento dos fundos e que haja agitação menos energética a sotamar da estrutura. Esta dissipação de energia associada aos fenómenos referidos é que proporcionará o transporte e a acumulação de sedimentos para essas zonas mais calmas. Ao mesmo tempo que se pretende criar essas regiões de menor agitação é importante garantir que essa diminuição de energia não leve a que não haja renovação da água. Se a estrutura for submersa, ocorre rebentação das ondas e o fluxo transmitido sobre a estrutura também transporta areia.

A deposição verificada levará à formação de bancos de areia, consoante a sua dimensão são chamados de saliências ou tômbolos. No primeiro caso trata-se de um prolongamento da praia na zona protegida, no segundo caso, esse prolongamento atinge a estrutura. No caso de um sistema de quebra-mares, ou seja, mais que um segmento, estas formações dependerão também da direcção das ondas, podendo formar-se saliência num e tômbolo noutro.

É possível também a formação de dupla saliência. Existem duas configurações conhecidas por este nome. Para alguns autores verifica-se dupla saliência quando se forma uma saliência tradicional e outra junto ao talude posterior. Por outro lado, outros autores consideram dupla saliência quando se formam duas saliências consecutivas em planta, figura 2.12.

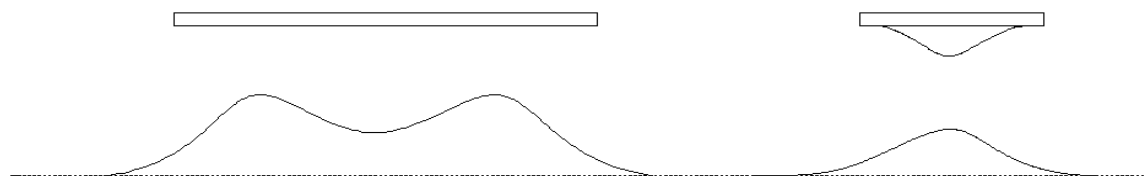


Fig. 2.12 – Casos distintos de dupla saliência.

A saliência forma-se quando o comprimento adimensionalizado for menor que 0,6 a 0,7. E o tômbolo forma-se quando esse parâmetro for superior a aproximadamente 0,9 a 1, figura 2.13, em que os parâmetros indicados representam:

- $L_s$  – comprimento;
- $X$  – distância a costa;
- $X_{80}$  – largura da zona de rebentação e espraioamento onde se verifica aproximadamente 80% do transporte longitudinal;
- $L_s^* = L_s/X$  – comprimento adimensionalizado referente à distância à linha de costa;
- $X^* = X/X_{80}$  – distância adimensionalizada referente às larguras de rebentação e espraioamento.

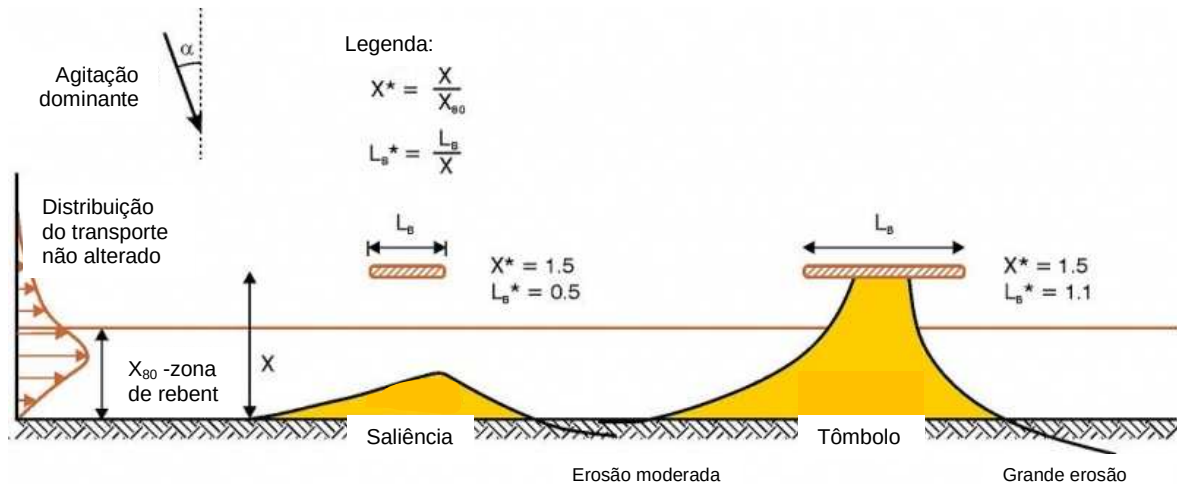


Fig.2.13 – Configurações típicas de praias com quebramares destacados (adaptado de <http://www.encora.eu/coastalwiki>)

Os quebramares podem-se caracterizar sua pela distância à linha de costa, já que esta influencia a resposta da linha de costa à construção da estrutura. Podem ser externos ( $X^* > 3$ ), que são usados quando se pretende abrigar um berço portuário ao largo. Localizando o quebramar ao largo serão desprezáveis os impactos a nível morfológico, mas ao mesmo tempo são alcançadas boas condições de abrigo para o porto. Podem ainda ser costeiros ( $0,5 < X^* < 2$ ) sendo as areias capturadas no trecho de influência do tardoz, já que é a área protegida da erosão, ou de praia ( $X^* < 0,5$ ), onde não há interferência significativa com o transporte longitudinal de sedimentos.

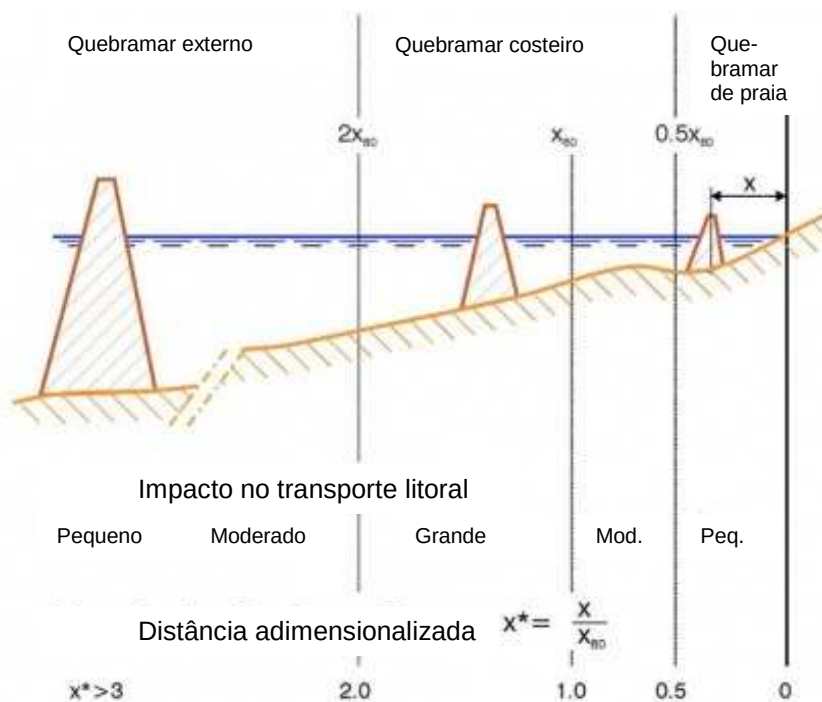


Fig. 2.14 – Tipos de quebramares consoante a sua localização. (adaptado de <http://www.encora.eu/coastalwiki>).

### 2.3.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Como qualquer outra estrutura, aos quebramares destacados estão associadas vantagens e inconvenientes, já que afectarão não só a natureza (praia, paisagem, água, etc) como também alguns aspectos socioeconómicos da região, como o turismo, comércio e restauração.

Além desses aspectos referentes ao que está associado à existência do quebramar, existem ainda vantagens e desvantagens associadas à própria construção e manutenção. Se por um lado a reparação após alguns assentamentos leva a que haja um aumento de estabilidade e de eficiência, as quantidades de material e o tipo de operações fazem com que o seu custo seja elevado. Estando a construção dependente das marés e da meteorologia locais, os prazos de execução podem ser demorados, e por vezes imprevisíveis.

Do ponto de vista ambiental, os impactes estão bastante relacionados com as características da obra, ou seja, se se trata de um quebramar externo, costeiro ou de praia; emerso ou submerso; e de factores como o espaçamento entre segmentos e o comprimento.

#### 2.3.5.1. Impactes hidrodinâmicos

Como já se referiu, a presença de um quebramar destacado provocará alterações locais ao nível da propagação da agitação. Essas mudanças levam a que além de agitação atingir a costa com menor energia na zona protegida, o faça em direcções diferentes do habitual. Porém a energia nunca será totalmente dissipada, dependendo a percentagem de energia dissipada da cota de coroamento e da porosidade. Por exemplo, no caso de quebramares submersos a determinadas horas do dia, consoante o nível de maré, a agitação será transmitida por cima da estrutura, sendo a dissipação efectuada caso ocorra uma prévia rebentação, provocada pela estrutura.

Devido a haver mais transmissão de energia em quebramares submersos leva a que estes sejam mais favoráveis na manutenção da qualidade da água, pois garante a renovação da mesma. No caso de quebramares emersos, para evitar a estagnação da água, é conveniente a existência de aberturas entre vários segmentos, porém essas aberturas darão origem a correntes de retorno no local. Já nos submersos há possibilidade de construir estruturas longas (Taveira Pinto e A. Neves, 2004).

#### 2.3.5.2. Impactes biomorfológicos

Ao nível do transporte sedimentos, os impactes também dependem do dimensionamento efectuado, já que se for prevista a formação de tómbolo o transporte sedimentar pelas correntes longitudinais será interrompido. No caso de se formar apenas uma saliência esse transporte não é interrompido, mas as correntes de difracção farão com que mais sedimentos se acumulem naquele local, sendo necessário prevenir assoreamentos.

Por outro lado, o facto de existir acumulação de sedimentos, benéfico para a praia protegida, fará com que as praias a Sul (no caso de Portugal) recebam menores quantidades de sedimentos. Acentuando-se, nesses locais, a erosão já que não há reposição dos sedimentos transportados a partir daí.

Estas alterações morfológicas têm influência sobre as espécies, pois haverá mudanças nos seus habitats, havendo perdas no zooplâncton e fitoplâncton. Ao mesmo tempo que algumas espécies desaparecem outras surgem pelas novas condições locais. Associado a este fenómeno está o aparecimento de alguns organismos que por vezes criam as suas colónias nas proximidades dos

quebramares destacados. Parecendo um impacto positivo a nível ambiental, do ponto de vista da utilização das praias não é muito favorável pois pode piorar a qualidade da água.

#### 2.3.5.3. Impactes paisagísticos

Os quebramares destacados terão diferentes cotas de coroamento consoante a eficiência desejada. Tratando-se de estruturas emersas poderá haver um impacto bastante negativo na paisagem, o que poderá afectar a região dependendo da importância que a paisagem tem, que, em Portugal, se verifica em quase toda a costa, pois quem utiliza as praias não o faz só pelos banhos no mar, mas também pelas paisagens que existem nas praias. Por isso se recorre também a estruturas submersas quando há essa possibilidade, já que estarão visíveis só nas horas de maré baixa. Quando não é possível que a estrutura seja submersa, os projectistas têm procurado encontrar soluções que não sejam muito agressivas para a paisagem, utilizando pequenos graus de submergência. Não é possível torná-las totalmente agradáveis pela interrupção que criam encurtando a distância à linha do horizonte.

Uma solução possível para diminuir os efeitos na paisagem é a construção com enrocamento, pois com o passar do tempo a estrutura pode assemelhar-se a um afloramento rochoso natural.

#### 2.3.5.4. Impactes socioeconómicos

A eficiência ou ineficiência de um quebramar destacado tem grande influência na economia local. Se o objectivo for a protecção de uma praia e houver assoreamento dando origem a saliência ou tómbolo, verificar-se-á uma melhoria no turismo local pelas novas condições balneares. Porém se se pretender criar um porto abrigado, mesmo que seja um pequeno porto de pesca, não se espera que haja acumulação de sedimentos, já que se esse fenómeno ocorrer poderá ser muito prejudicial para a economia local devido a dependência da actividade.

Lembrando mais uma vez os impactes negativos criados na paisagem, a atracção ao local pela sua beleza poderá diminuir levando a que menos pessoas frequentem o local.

Então é importante que haja o cuidado de projectar tendo em atenção os impactes provocados e o objectivo da obra, já que os primeiros serão positivos ou negativos dependendo do segundo.



# 3

## DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICO E ESTRUTURAL DE QUEBRAMARES DESTACADOS

### 3.1. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

O dimensionamento hidráulico de um quebramar destacado tem como objectivo a definição da localização e a projecção do resultado da sua construção na linha de costa. Consoante as condicionantes locais, o dimensionamento hidráulico poderá ser facilitado ou dificultado. Os métodos empíricos existentes baseiam-se em parâmetros como o tipo de praia e as características da agitação local. Se se pretender que a estrutura se localize a grandes profundidades é necessário um estudo estatístico da agitação, já que aí a altura de onda não está limitada pela profundidade enquanto em menores profundidades é importante conhecer as irregularidades dos fundos para analisar a interacção destes com as ondas.

Para que o funcionamento hidráulico do quebramar seja satisfatório é preciso que se verifique não só a esperada evolução da linha de costa mas que haja a dissipação de energia desejada. Para isso é necessário estimar a transmissão de energia já que dela dependerá a eficácia da obra, sendo um dos objectivos criar uma zona calma a barlar da estrutura.

Por esses motivos têm sido desenvolvidos vários estudos, com recurso a métodos empíricos e a modelos físicos, com o objectivo de aperfeiçoar o dimensionamento de quebramares destacados. Um dos aspectos estudados é a resposta da linha de costa após a construção do quebramar destacado, já que é importante conhecer os impactes morfológicos que a presença da estrutura provocará. Outro aspecto que também tem sido estudado é a transmissibilidade e a permeabilidade da estrutura, ajudando a prever como será a agitação a sotamar da estrutura.

#### 3.1.1. TRANSMISSÃO DA AGITAÇÃO

Como já foi referido, um dos objectivos de um quebramar destacado é a diminuição da agitação a barlar. Por isso, é importante atender a esses aspectos no projecto, considerando que alguma agitação será sempre transmitida, seja devido à permeabilidade, ou aos galgamentos, ou aos dois simultaneamente.

Têm sido efectuados vários estudos no sentido de determinar a agitação que alcança a linha de costa após ultrapassar este obstáculo, representada pelo coeficiente de transmissão  $K_t$ , que é de grande importância nos estudos relativos à resposta da linha de costa. No âmbito do projecto DELOS foi reunida uma grande variedade de dados, relativos a estudos relacionados com a transmissibilidade.

Foram analisados os que mais se adequam a este projecto, nomeadamente os de Briganti *et al.* (2003), van der Meer e Daemen (1994) e d'Agremond *et al.* (1996). Foram também utilizadas as fórmulas sugeridas por Taveira Pinto (2001), pelo facto de permitirem o cálculo em estruturas submersas, e por Ahrens (2001), que diferencia a transmissão através e sobre a estrutura.

Briganti *et al.* (2003) faz uma análise completa dos dados recolhidos e conclui que existem duas fórmulas que devem ser aplicadas. Uma para estruturas com coroamento estreito e outra para estruturas com coroamento largo e submersas. As equações que sugere, equações 3.1 e 3.2, são fórmulas originalmente apresentadas por d'Agremond *et al.* (1996) com pequenas adaptações.

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_i} + 0.64 \left( \frac{b}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}), \quad \frac{b}{H_i} < 10 \quad (3.1)$$

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_i} + 0.51 \left( \frac{b}{H_i} \right)^{-0.65} (1 - e^{-0.41\xi}), \quad \frac{b}{H_i} > 10 \quad (3.2)$$

Estas equações relacionam parâmetros como a submergência relativa,  $R_c$ , a altura de onda incidente,  $H_i$ , a largura do coroamento,  $b$ , e o parâmetro de Battjes. Uma vez que o último está dependente da declividade, é fácil compreender que todos estes parâmetros indicados influenciam na realidade a transmissão através da estrutura.

No entanto, existe um limite para a aplicação das equações 3.1 e 3.2. Para a primeira o limite de utilização é  $0.07 < K_t < 0.80$ , e para a segunda o coeficiente de transmissão deverá ser maior que 0,05 e menor que o valor dado pela seguinte equação.

$$K_{tu} = -0.006 \frac{b}{H_i} + 0.93 \quad (3.3)$$

A transição entre as equações 3.1 e 3.2 não é continua. Se for necessário que o seja deve-se utilizar a primeira para  $b/H_i \leq 8$  e a segunda para  $b/H_i \geq 12$ .

Quando se utilizam parâmetros adimensionais, como  $R_c/H$ , é provável que surjam dificuldades, por exemplo, se  $R_c$  for nulo deixa de ser possível avaliar a influência de  $H$ . Daí que van der Meer tenha separado a sua análise, introduzindo como denominador o diâmetro médio dos blocos  $D_{n50}$ , criando assim dois parâmetros adimensionais, permitindo a distinção entre diferentes casos. Da aplicação desses parâmetros à informação recolhida por Daemen (1991) resultou a equação 3.4 que é válida tanto para quebra-mares convencionais como para recifes artificiais.

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (3.4)$$

$$a = 0,031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,24 \quad (3.5)$$

$$b = -5,42s_{0p} + 0,323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,0017 \left( \frac{B}{D_{n50}} \right)^{1,84} + 0,51 \text{ (quebramares convencionais)} \quad (3.6)$$

$$b = -2,6s_{0p} - 0,05 \frac{H_i}{D_{n50}} + 0,85 \text{ (recifes artificiais)} \quad (3.7)$$

Os limites do valor de  $K_t$  resultantes da equação (3.4) dependem do tipo de estrutura a que se aplica. Para quebramares convencionais pode variar entre 0,075 e 0,75, e para recifes artificiais entre 0,15 e 0,60, para  $R_c/D_{n50} < -2$ , podendo atingir 0,8 quando  $R_c/D_{n50} = -6$ .

Com base em ensaios em modelo reduzido, realizados por Taveira Pinto (2001) na FEUP, resultou uma metodologia que permite determinar o coeficiente de transmissão para quebramares galgáveis. O modelo recorre ao coeficiente adimensional de transmissibilidade, equação 3.8. Além disso entram também como variáveis a altura de onda significativa  $H_s$ , a altura de onda relativa  $H_s/gT_p^2$ , o número de Iribarren  $\xi$ , a altura livre relativa acima da crista,  $R_c/H_s$ .

$$R^* = \frac{|R_c|}{T_p \sqrt{gH_s}} \quad (3.8)$$

Dos vários modelos utilizados, foi possível optar pelo modelo nº9, já que é o único que apresenta taludes de natureza rugosa, 1:2, sendo por isso o que mais se adequa ao projecto em questão.

Os coeficientes de transmissão devem portanto ser determinados de acordo com as curvas resultantes dos ensaios desse modelo quer seja em função do coeficiente de transmissibilidade  $R^*$ , ou em função da altura de onda significativa  $H_s$ .

Para o projecto em questão foram utilizadas as curvas referentes aos períodos em modelo de 1,0 à escala 1/100 e 1,25 também à escala 1/100, tanto para o coeficiente de transmissibilidade, equações 3.9 e 3.10, como para a altura de onda significativa, equações 3.11 e 3.12.

$$K_t = 0,171 \ln(R^*) + 1,246 \quad (3.9)$$

$$K_t = 0,090 \ln(R^*) + 1,008 \quad (3.10)$$

$$K_t = -0,212 \ln(H_s) + 0,990 \quad (3.11)$$

$$K_t = -0,108 \ln(H_s) + 0,852 \quad (3.12)$$

Uma análise mais completa é a de Ahrens (2001), que apresenta um coeficiente ponderado, que contabiliza a transmissão sobre a estrutura, ou seja, por galgamento, e a transmissão através da estrutura, dependente da permeabilidade. Esta análise é efectuada em função da altura do coroamento acima do nível médio da água do mar,  $R_c$ , relativamente à altura de onda significativa ao largo,  $H_{s,0}$ .

Apresenta-se como ideias base que a transmissão será diferente consoante a estrutura estiver submersa,  $R_c/H_{s,0} < 0$ , estiver emersa mas for de baixa cota de coroamento,  $0 \leq R_c/H_{s,0} < 2$ , e finalmente se for considerada não-galgável,  $R_c/H_{s,0} \geq 2$ . Estando submersa a transmissão dá-se por galgamento, sendo de baixa cota de coroamento, a transmissão efectua-se por galgamento e através da estrutura e, se for não-galgável, a transmissão é apenas através da estrutura.

Assim, os coeficientes de transmissão parciais,  $(K_t)_{através}$  e  $(K_t)_{sobre}$ , são calculados pelas equações 3.16 e 3.17, com base nos parâmetros  $f_{através}$  e  $f_{sobre}$  das equações 3.13 e 3.14. Com esses resultados é possível determinar o coeficiente de transmissão total  $K_t$  pela equação 3.18. Quando se tratar de um quebramar submerso o cálculo é efectuado com base na equação 3.15 e não na equação 3.14. Aparecem também como variáveis o diâmetro nominal do enrocamento,  $D_{n50}$ , o comprimento de onda em grandes profundidades  $L_0$ , a altura total da estrutura e a área da secção transversal da estrutura,  $A_t$ .

$$f_{através} = \frac{H_s^{0,982}}{D_{n50}} e^{0,433+2,35 \frac{A_t}{L_0 h_c}} \quad (3.13)$$

$$f_{sobre} = e^{0,465+12,7 \frac{R_c}{\sqrt{H_s L_0}} - \frac{17,4}{D_{n50} h_c} + \frac{0,00118}{L_0} \frac{H_s}{L_0}} \quad (3.14)$$

$$f_{sobre}^* = e^{-0,646+0,631 \frac{R_c}{H_s} + 0,00137 \frac{A_t}{D_{n50}^2}} \quad (3.15)$$

$$(K_t)_{através} = \frac{1}{(1 + f_{através})} \quad (3.16)$$

$$(K_t)_{sobre} = \frac{1}{(1 + f_{sobre})} \quad (3.17)$$

$$K_t = \sqrt{(K_t)_{através} + (K_t)_{sobre}} \quad (3.18)$$

### 3.1.2. ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS

Muitos autores têm apresentado critérios para a formação de tômbolos e saliências, tendo estudado a resposta da linha de costa à presença de uma estrutura, procurando encontrar a forma de equilíbrio da praia. González e Medina (2001) propõem uma metodologia que permite através de vários parâmetros encontrar a possível forma da futura praia. Outros métodos mais simples baseiam-se apenas nas relações entre o comprimento do quebramar, o espaçamento entre dois segmentos e a distância à linha de costa original para determinar se haverá formação de tômbolo, saliência ou nenhum. Pela sua simplicidade, a utilização destas fórmulas deve servir apenas como uma primeira aproximação, devendo ser efectuado um estudo em modelo físico reduzido para confirmar os resultados. Em fase de projecto é ainda interessante a aplicação do método do *Japanese Ministry of Construction* (JMC), que sendo um método iterativo permite encontrar uma possível posição da estrutura para a resposta desejada.

Pereira (2008) apresenta vários métodos possíveis de aplicar neste caso, aos quais foram acrescentados mais alguns para quebramares segmentados, quadro 3.1, onde se apresentam as condições para as diferentes respostas da linha de costa segundo cada autor.

Quadro 3.1 – Resumo das condições para formação de saliências e tómbolos ( $L_s$  – comprimento da estrutura;  $X$  – distância à linha de costa inicial;  $L_g$  – abertura entre segmentos;  $K_t$  – coeficiente de transmissão;  $H_0$  – altura de onda para grandes profundidades;  $d$  – profundidade local).

| Referência                                    | Condição                                                         | Resposta da linha de Costa           |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) | $1,0 \leq \frac{L_s}{X} < 1,5$                                   | Tômbolo                              |
|                                               | $0,5 \leq \frac{L_s}{X} < 1,0$                                   | Saliência                            |
|                                               | $\frac{L_g X}{L_s^2} > 0,5$                                      | Saliência para múltiplos quebramares |
| Pillarczyc (2003)                             | $1,0 < \frac{L_s(1 - K_t)}{X} < 1,5$                             | Tômbolo                              |
|                                               | $\frac{L_s}{X} > \frac{1}{1 - K_t}$                              | Saliência                            |
|                                               | $\frac{L_g X}{L_s^2} > 0,5(1 - K_t)$                             | Saliência para múltiplos quebramares |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  | $\frac{L_s}{L} \leq 11(1 - K_t) \frac{H_0}{d}$                   | Tômbolo                              |
|                                               | $\frac{L_s}{L} \leq 48(1 - K_t) \frac{H_0}{d}$                   | Saliência                            |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          | $\frac{L_s}{X} > 0,65$ (ilhas)                                   | Tômbolo                              |
|                                               | $\frac{L_s}{X} > 0,60$ (recifes)                                 |                                      |
|                                               | $\frac{L_s}{X} < 1,0$ (ilhas)<br>$\frac{L_s}{X} < 2,0$ (recifes) | Saliência                            |
| Ming e Chiew (2000)                           | $\frac{X}{L_s} > 0,8$                                            | Saliência                            |
| Black e Andrews (2001)                        | $\frac{L_s}{X} < 2$                                              | Saliência                            |
| Suh e Dalrymple (1987)                        | $1,0 < \frac{L_s}{X}$                                            | Tômbolo                              |
|                                               | $\frac{L_g X}{L_s^2} \cong 0,5$                                  | Tômbolo para múltiplos quebramares   |
| Gourlay (1981)                                | $\frac{L_s}{X} > 0,67$                                           | Tômbolo                              |
|                                               | $0,4 < \frac{L_s}{X} < 0,5$                                      | Saliência                            |
|                                               | $\frac{L_s}{X} > 2$                                              | Dupla Saliência                      |

Em alguns destes modelos os autores apresentam não só as condições apresentadas no quadro 3.1 mas também equações que permitem calcular a dimensão da saliência, seja pelo seu avanço face à linha de costa original seja pela sua área. Suh e Dalrymple (1987) relacionam a largura da saliência com a distância à linha de costa original pela equação 3.19. Da mesma forma Black e Andrews (2001) apresentam relações entre a distância da saliência ao quebramar e o comprimento do mesmo e entre a largura da saliência e o comprimento do quebramar, quadro 3.2 e figura 3.1. Já Ming e Chiew (2000) sugerem a equação 3.20 para determinar a possível área em planta da saliência.

$$X_S = 15,8X \frac{L_g X}{L_s^2} e^{-2,83 \sqrt{\frac{L_g X}{L_s^2}}} \quad (3.19)$$

Quadro 3.2 – Dimensão das saliências, Black e Andrews (2001).

| Ilhas                                                             | Recifes                                                           |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\frac{X_{off}}{L_s} = 0,40 \left( \frac{L_s}{X} \right)^{-1,52}$ | $\frac{X_{off}}{L_s} = 0,50 \left( \frac{L_s}{X} \right)^{-1,27}$ |
|                                                                   | $\frac{Y_{off}}{D_{tot}} = 0,125 \pm 0,02$                        |

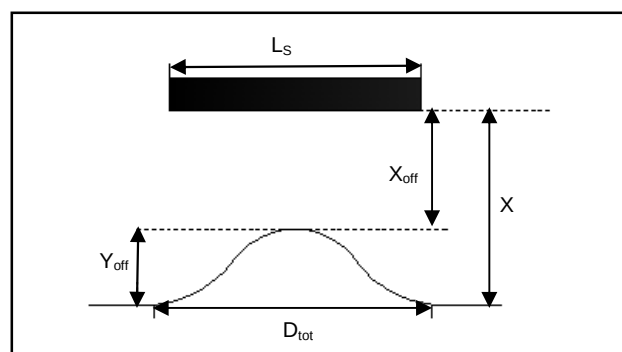


Fig 3.1 – Definição esquemática dos parâmetros.

$$\frac{A}{X^2} = -0,348 + 0,043 \frac{X}{L_s} + 0,711 \frac{L_s}{X} \quad (3.20)$$

Pope e Dean (1986) caracterizaram a resposta da linha de costa através dos parâmetros  $L_s/L_g$  e  $X/d$ . Do primeiro, entende-se que se refere à capacidade de um sistema absorver a energia das ondas e, do segundo, que representa a resposta do sistema no que diz respeito à difracção e sedimentação. Naturalmente que a costa será tanto mais alterada quanto menor for a energia que a atinge. A figura 3.2 pode ajudar a encontrar a localização da estrutura ou a resposta da linha de costa.

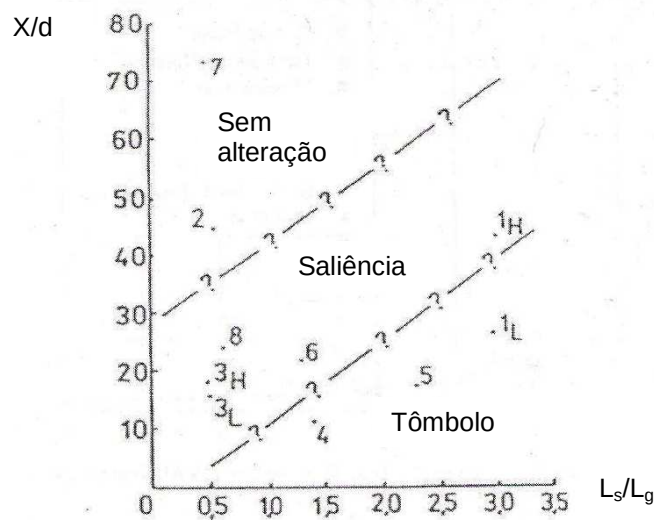


Fig. 3.2 – Efeito de um quebramar destacado sobre a linha de costa, Pope e Dean, 1986 (adaptado de Pilarczyk e Zeidler, 1996).

Com base nesta classificação Ahrens e Cox (1990) obtiveram a equação 3.21 para a resposta da linha de costa em função da abertura entre segmentos, sendo  $I_S$  a resposta da linha de costa.

$$I_S = e^{1,72 - 0,41 \frac{L_S}{L_g}} \quad (3.21)$$

Os possíveis resultados são os seguintes:

- $I_S = 1$  – Tômbolo
- $I_S = 2$  – Tômbolos periódicos
- $I_S = 3$  – Saliência bem desenvolvida
- $I_S = 4$  – Saliência pouco desenvolvida
- $I_S = 5$  – Não há alteração

### 3.1.2.1. Forma de equilíbrio estático a sotamar da estrutura

De modo a prever a resposta da linha de costa, González e Medina (2001) recorreram aos parâmetros da formulação de Hsu e Evans (1989). Esta permite determinar o perfil de equilíbrio estático da praia com base nos parâmetros da figura 3.3 e, recorrendo a uma formulação parabólica, caracterizar as regiões originadas devido aos efeitos da refração e difracção. Numa região afastada da estrutura não há qualquer alteração na agitação devido à presença da mesma. À medida que a proximidade ao quebramar destacado aumenta, os gradientes de variação da altura de onda aumentam também, verificando-se em primeiro lugar fenómenos de refração e em último, fenómenos de refração e difracção.

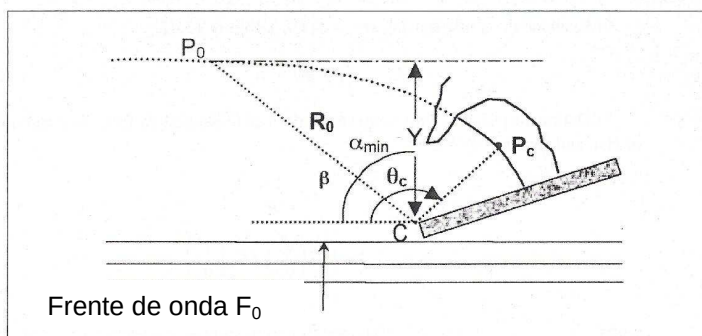


Fig. 3.3 – Esquema representativo das diferentes variáveis (adaptado de Burcharth *et al.*, 2007).

Utilizando o parâmetro  $\alpha_{min}$  calculado com base na equação 3.22, e o resultado da metodologia de Hsu e Evans (1989), González e Medina (2001) criam relações que prevêm a formação de tómbolo, saliência e dupla saliência. O parâmetro  $\beta_r$  é constante com o valor 2,13, resultado de observações efectuadas em várias praias espanholas.

$$\alpha_{min} = \arctan \left[ \frac{\left( \frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^4}{2} \frac{Y}{L_s} \right)^{1/2}}{\frac{Y}{L_s}} \right] \quad (3.22)$$

As diferentes respostas estão dependentes da distância do quebramar à praia e do comprimento do mesmo relativamente ao comprimento das ondas incidentes. Se o quebramar for costeiro e longo é provável a formação de um tómbolo. Das variáveis presentes na figura 3.4 as desconhecidas são o comprimento da estrutura  $2B$  e a largura de ligação do tómbolo à estrutura,  $2B_k$ , que podem ser determinadas pela formulação de Hsu e Evans.

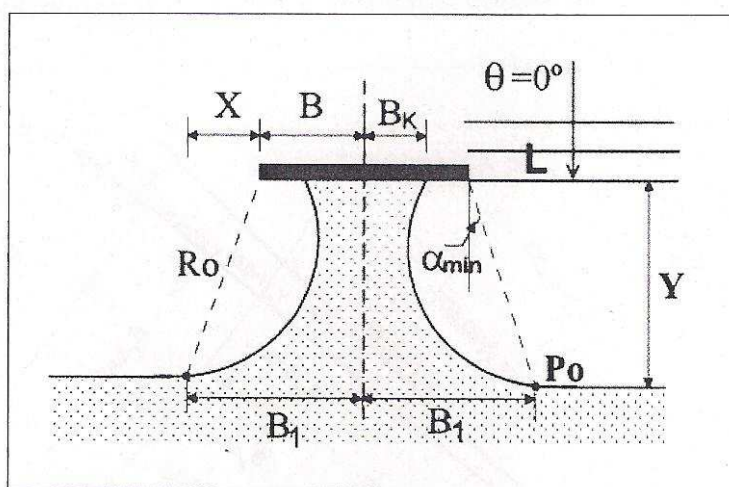


Fig. 3.4 – Definição esquemática de um tómbolo (González e Medina, 2001).

Quando as condições de formação do tómbolo não se verificam, ou seja, quando o quebramar é de pequeno desenvolvimento e está afastado da costa, a resposta morfológica será uma saliência, figura 3.5. As variáveis aqui presentes são as mesmas do caso anterior. A variável desconhecida neste caso é  $Y_0$  que pode ser determinada pela metodologia de Hsu e Evans e pela expressão de  $\alpha_{min}$ . As diferentes soluções estão representadas na figura 3.6, González e Medina (2001).

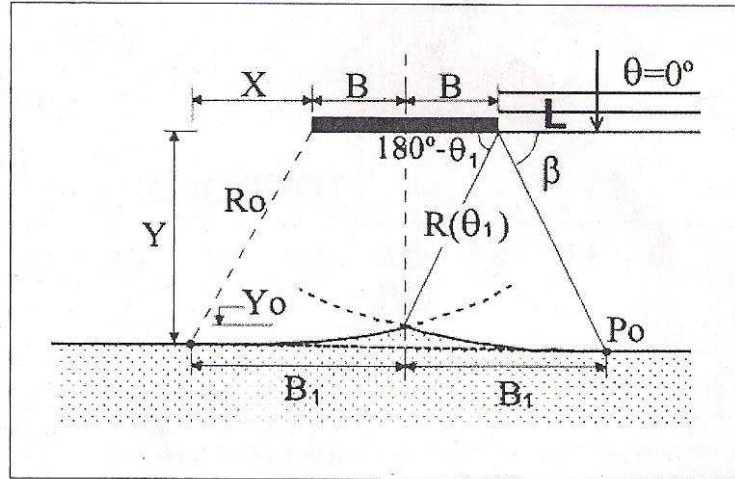


Fig. 3.5 – Definição esquemática de uma saliência teórica (González e Medina, 2001).

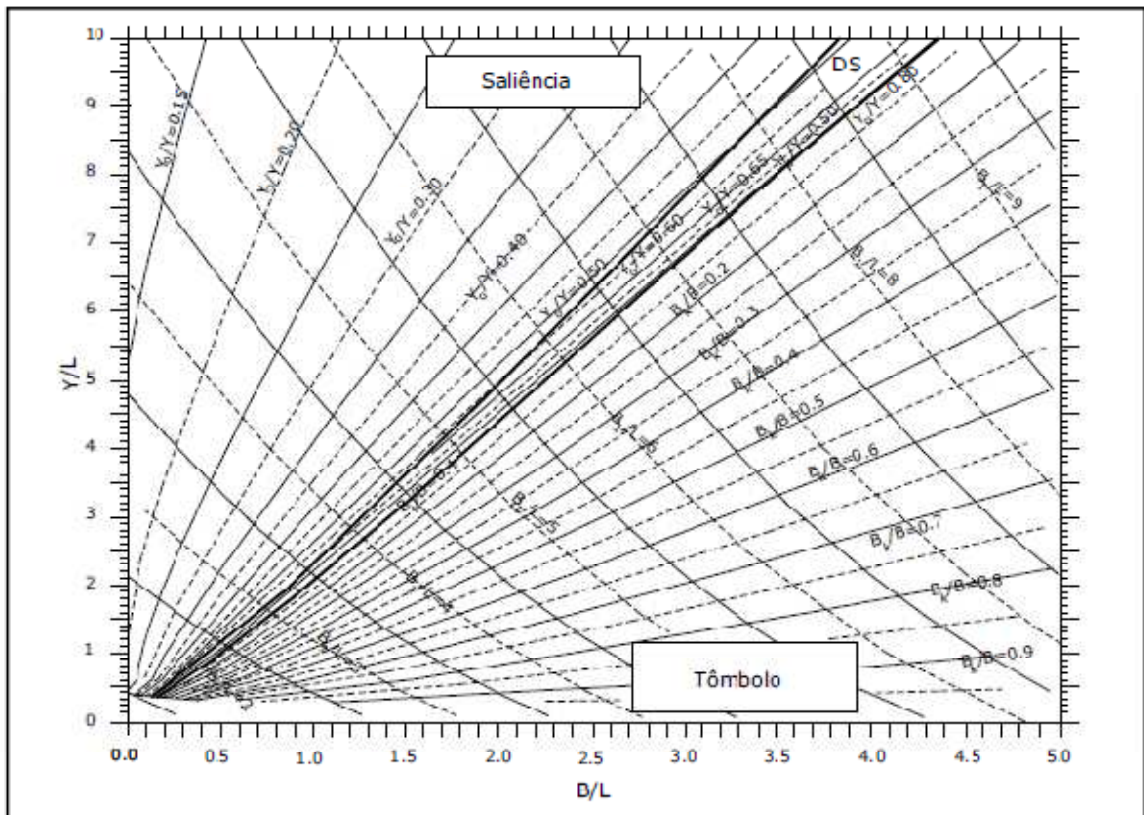


Fig. 3.6 – Variação dos parâmetros adimensionais da forma em planta de equilíbrio para tómbolo, saliência e dupla saliência para diferentes valores do comprimento do quebramar  $2B$ , da distância do quebramar à linha de costa,  $Y$ , e do comprimento de onda,  $L$  (Gonzalez e Medina, 2001).

Na realidade não existe apenas um ponto de difracção, sendo por isso a forma da saliência diferente da da figura 3.5. A largura efectivamente verificada é  $Y_s$ , figura 3.7. Hsu e Silvester (1990) sugerem uma formulação empírica que permite determinar a distância do quebramar à saliência ( $Y' = Y - Y_s$ ), equação 3.23. A curva da figura 3.8 apresenta uma relação semelhante à formulação de Hsu e Silvester (1990), válida para  $0,3 < B/L < 1,5$  e  $2,0 < Y/L < 4,0$ .

$$\frac{Y'}{2B} = 0,50 \left( \frac{2B}{Y} \right)^{-\sqrt{2}} \quad (3.23)$$

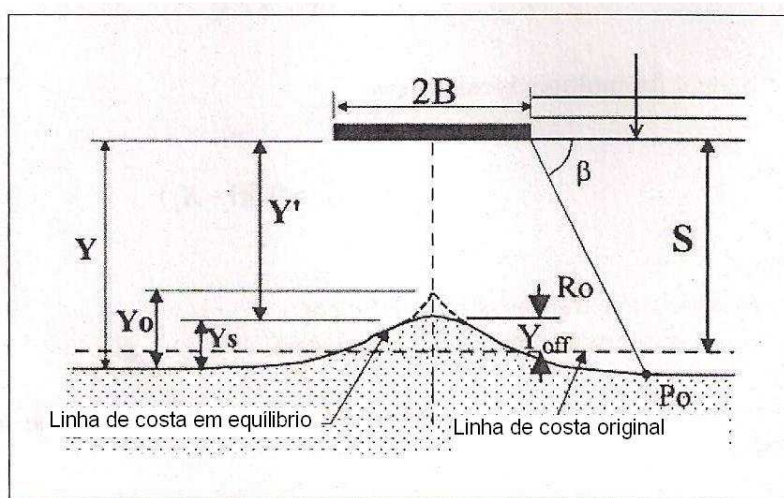


Fig. 3.7 – Definição esquemática de uma saliência teórica - linha tracejado - e real - linha contínua (González e Medina, 2001).

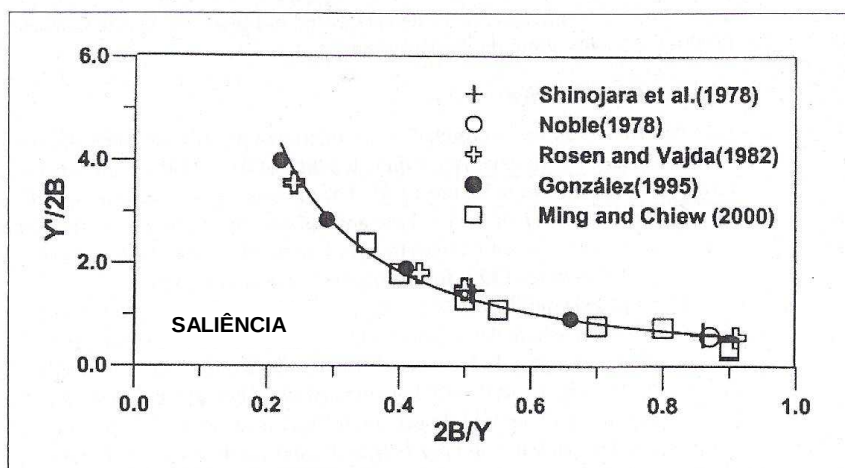


Fig. 3.8 – Relação entre as formas de saliência teórica e real (adaptado de Burcharth et al., 2007).

O caso intermédio entre os dois apresentados é a formação de duas saliências, uma na linha de costa e outra junto à estrutura, figura 3.9. Além das variáveis que influenciam os casos de tómbolo e saliência,

acrescenta-se neste caso a largura da saliência junto à estrutura,  $Y_2$ , cujo método de cálculo não será aqui exposto.

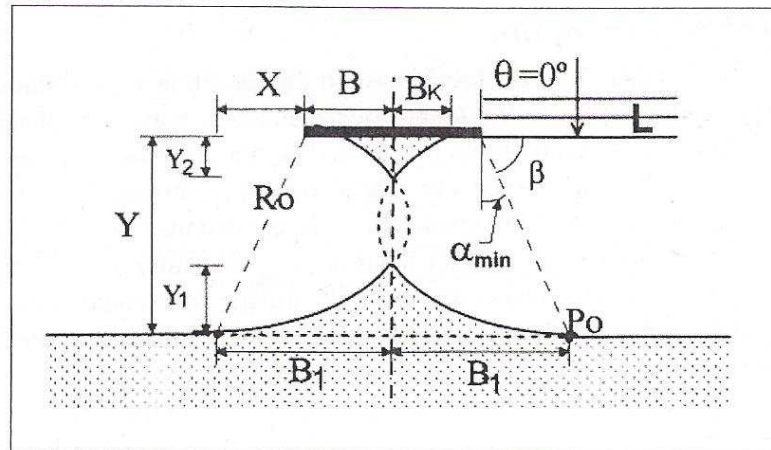


Fig. 3.9 – Definição esquemática de saliência dupla teórica (González e Medina, 2001).

### 3.1.2.2. Japanese Ministry of Construction (JMC)

No âmbito de um estudo de quebramares destacados construídos no Japão, foi desenvolvido pelo Ministério Japonês da Construção um método que se processa de modo iterativo, tendo como objectivo localizar a estrutura de modo a que se forme a saliência desejada. Como já foi referido, o objectivo deste método é determinar em primeira aproximação a profundidade e a distância onde se deverá construir a estrutura. Com o resultado obtido é possível fazer uma segunda verificação da resposta da linha de costa com recurso a outros métodos.

O método é iterativo e faseado e está dependente de variáveis locais, tal como noutros métodos. A altura de onda e período utilizados são os relativos à média das cinco maiores ondas registadas num ano,  $H_{05}$  e  $T_{05}$ . O tipo de praia também é tido em conta, tendo sido considerados cinco tipos, com diferentes inclinações (inclinação média do talude submerso), forma e sedimentos existentes. As praias foram classificadas de A a E. A praia do tipo A apresenta pequenas alturas de onda e pequenos movimentos dos sedimentos, que são areias finas; a praia do tipo B possui uma barra bem desenvolvida, uma inclinação suave até ao limite da profundidade de fecho, a linha de costa é perpendicular à direcção da agitação e sedimentos arenosos; numa praia do tipo C não se verifica a existência de barra, a inclinação é mais acentuada que a da praia B e é composta por areia e seixos; a praia do tipo D apresenta forte inclinação no talude submerso; e a praia do tipo E é semelhante à praia do tipo C mas por vezes pode apresentar a formação de uma barra ao largo. Além disto ainda são consideradas variáveis de acordo com a opção do projectista, tal como o comprimento da costa a proteger,  $L_p$ , e a largura de saliência desejada,  $X_s$ . Apesar de terem sido utilizadas como base estruturas permeáveis e impermeáveis o método não considera a transmissibilidade. A figura 3.10 apresenta como exemplo os perfis-tipo e as características das praias do tipo B e C.

Para iniciar o processo iterativo é necessário escolher em qual tipo de praia se insere a praia do projecto e conhecer os parâmetros da agitação. Depois, calcula-se o comprimento de onda ao largo,  $L_{05}$ , e a respectiva declividade,  $H_{05}/L_{05}$  para assim determinar o profundidade de rebentação local,  $d_{b5}$ , recorrendo às curvas da figura 3.11.

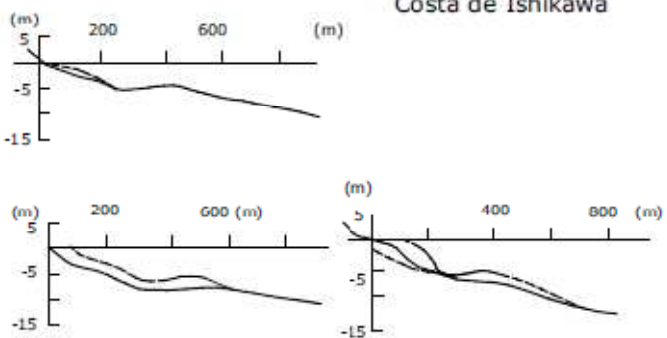
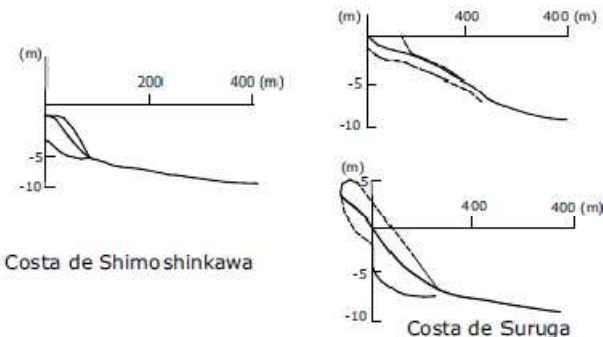
| TIPO DE PRAIA | PERFIL                                                                             | CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B             |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Barra bem desenvolvida;</li> <li>• Inclinação do talude é suave à profundidade de início de transporte sedimentar;</li> <li>• Linha de costa perpendicular à direcção médias da agitação;</li> <li>• <math>H_{0.5} \geq 0,5m</math></li> <li>• <math>i=1/30</math></li> <li>• Areia</li> </ul> |
| C             |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinação do talude relativamente acentuada e não existe barra;</li> <li>• <math>H_{0.5} \geq 0,5m</math></li> <li>• <math>i=1/15</math></li> <li>• Areia e seixos</li> </ul>                                                                                                                 |

Fig. 3.10 – Tipo de praia B e C segundo o método JMC, JMC (adaptado de Rosati e Truitt, 1990)

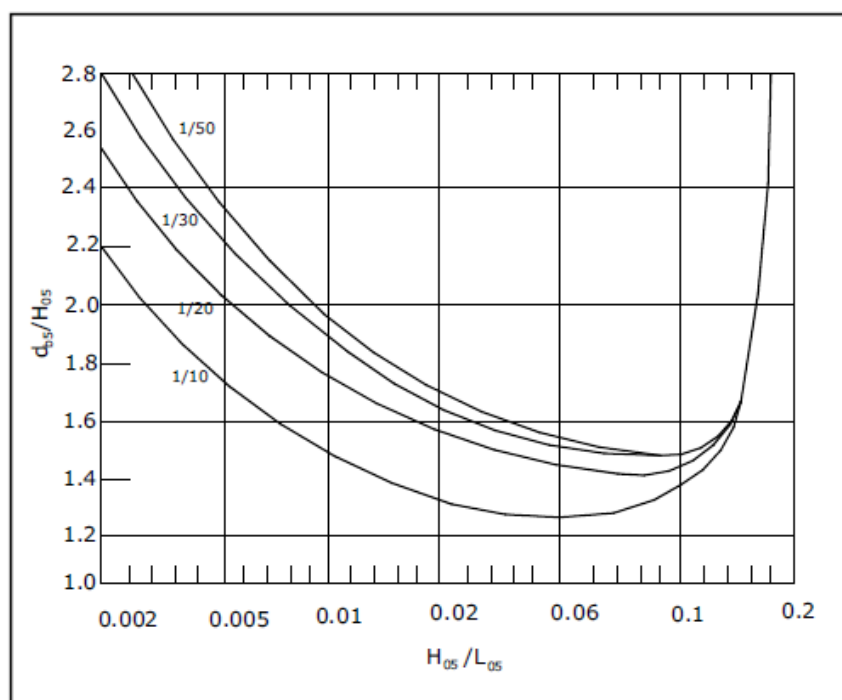


Fig.3.11 – Declividade em águas profundas versus declividade junto à costa, para várias inclinações médias do talude de praia, Goda, 1970 (Herbich, 2000).

Em seguida, arbitra-se a profundidade de implantação da estrutura,  $d'$ , de modo a que se localize entre a profundidade de rebentação,  $d_{b5}$ , e a profundidade referente à distância  $X_s$ ,  $X_{sI}$ . Para uma primeira estimativa sugere-se a média das duas profundidades referidas. Com recurso às figuras 3.12 e 3.13 é possível determinar os quocientes da área de saliência, SAR (*salient area ratio*), relativos apenas às praias dos tipos B e C, que são aquelas que foram usadas para este trabalho. A equação 3.24 permite também encontrar o valor desse parâmetro.

$$SAR = \frac{0,5L_cX_s}{XL_s} \quad (3.24)$$

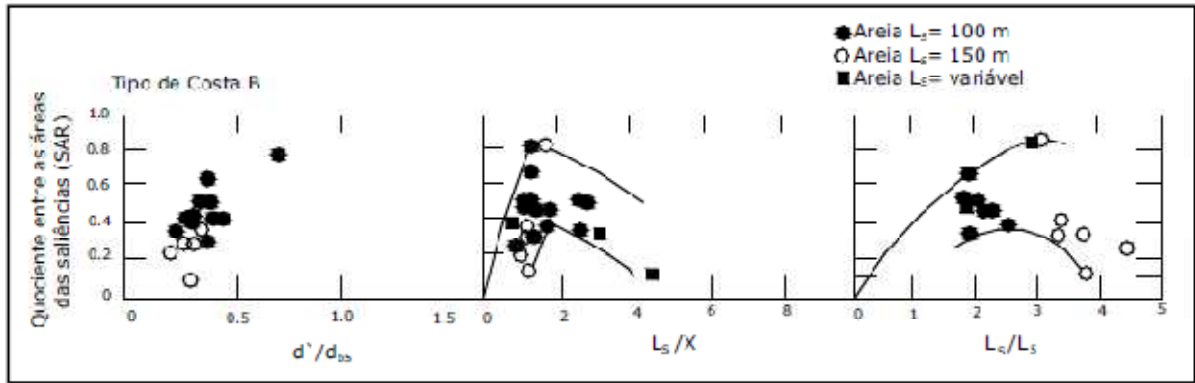


Fig. 3.12 – Relação entre SAR e alguns parâmetros locais para praias do tipo B, JMC (Rosati e Truitt, 1990).

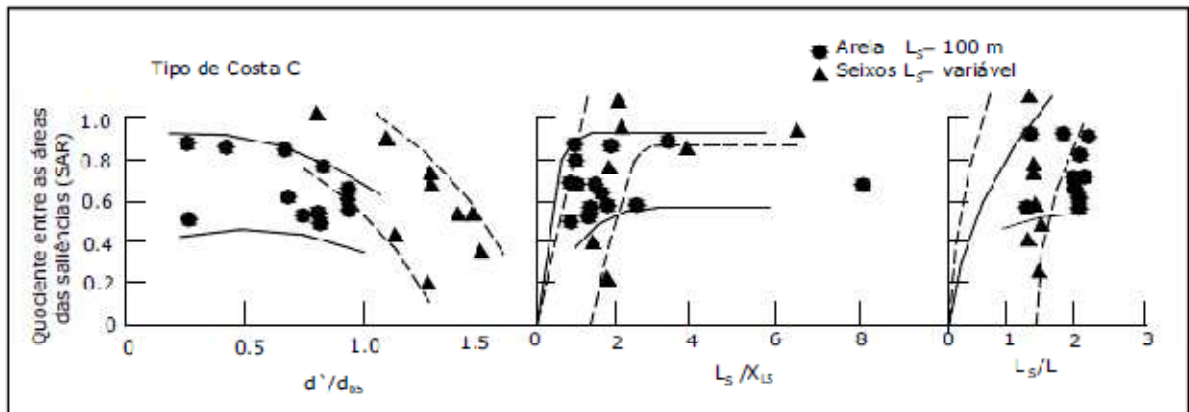


Fig. 3.13 – Relação entre SAR e alguns parâmetros locais para praias do tipo C, JMC (Rosati e Truitt, 1990).

Após determinar a SAR calcula-se a primeira estimativa da distância do quebramar à linha de costa original,  $X'$  que, multiplicado pelo quociente SAR indica a saliência esperada nessas condições,  $X'_s$ . Caso esta iguale a largura de saliência desejada  $X_s$  o processo iterativo está terminado e o cálculo segue com a determinação do comprimento do quebramar,  $L_s$ , e do espaçamento entre segmentos,  $L_g$ . Caso essa igualdade não seja alcançada é necessário repetir o processo arbitrando uma nova profundidade  $d'$  até se atingir essa igualdade. Da aplicação do JMC entende-se que a formação do tómbolo não está prevista, pois esta só ocorreria se  $X_s = X'$ .

Para o cálculo do comprimento do quebramar e do espaçamento entre segmentos retiram-se das figuras 3.12 e 3.13 relações entre essas variáveis e o comprimento de onda no local,  $L_5$ . Além disso é possível relacionar as variáveis desconhecidas com base em relações com a distância à linha de costa original. Da análise às figuras referidas é possível encontrar intervalos aconselháveis para essas relações, quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Intervalos para o comprimento do quebramar e espaçamento entre quebra-mares consecutivos.

|                             | Praia do tipo B                                | Praia do tipo C                                |
|-----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Comprimento da estrutura    | $1,8L_5 < L_S < 3,0L_5$<br>$0,8X < L_S < 2,5X$ | $1,4L_5 < L_S < 2,3L_5$<br>$1,0X < L_S < 3,5X$ |
| Espaçamento entre segmentos | $0,5L_5 < L_g < 1,0L_5$<br>$0,7X < L_g < 1,8X$ |                                                |

Dos quatro valores encontrados, o comprimento do quebramar será a média do máximo dos limites inferiores com o mínimo dos limites superiores. O mesmo sucede para o espaçamento entre segmentos.

### 3.2. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

As estruturas marítimas estão sujeitas a várias acções às quais deverão resistir para não se verificar a ocorrência da ruína. A principal acção é a agitação que, apesar de não ser a que tem maior intensidade é a mais frequente, sendo por isso a que deve ser tida mais em atenção. Naturalmente, não poderão ser esquecidos os sismos, os tsunamis, as correntes e as marés.

A agitação poderá ser interpretada de várias formas (regular, irregular, sequência de ondas, e outras) e poderá surgir no dimensionamento representada também de diversos modos. Alguns métodos recorrem apenas a características pouco realistas mas simples, como por exemplo a altura de onda incidente, numa abordagem com agitação regular, outros abordam o problema do dimensionamento tendo em conta mais aspectos, como a declividade da onda no local, estando por isso implícita também a profundidade.

É importante que entrem em consideração factores próprios da estrutura que irá suportar as acções em análise. Aqueles que mais vezes surgem são as características dos taludes e dos blocos (tipo, forma, etc.). Ao longo do tempo tem-se verificado que, sendo impossível que a estrutura permaneça intacta face à agitação, deve ser admitido um certo nível de estragos continuando a estrutura a funcionar eficazmente. Este aspecto surge normalmente como a percentagem ou nível de estragos admissíveis. Associado ao facto de se admitir um nível de estragos aceitável está a necessidade de que a estrutura corresponde uma solução económica, variando em cada caso consoante a importância do projecto e o investimento a realizar, ou seja, é necessário encontrar um equilíbrio entre a segurança da estrutura e aquilo que é economicamente viável.

O pré-dimensionamento necessita, em várias fases, do bom senso do projectista, já que os métodos existentes possuem de um modo geral muitas simplificações, devendo a solução final ser sempre sujeita a ensaios em modelo reduzido.

Existem actualmente várias fórmulas empíricas para a escolha do peso dos blocos a usar na estrutura, entre as quais a fórmula de Hudson (1974), van der Meer (1988), Powell e Allsop (1985) e Vidal *et al.*

(2000), que podem ser aplicadas abordando o dimensionamento segundo diferentes perspectivas. A primeira, sendo a mais simples, introduz poucas variáveis no cálculo, estando muito dependente das decisões do projectista; a segunda considera vários parâmetros representativos da agitação irregular; a terceira dá especial atenção aos níveis de estragos e por fim a última apresenta uma metodologia própria para quebramares destacados que diferencia a secção da estrutura.

Um dos parâmetros mais importantes a definir é a altura de onda de projecto,  $H_{proj}$ , cuja determinação deve ser efectuada com base em vários critérios já que influenciará significativamente a solução final, logo a eficácia da estrutura está bastante relacionada com a opção relativamente à altura de onda utilizada. Com base em ensaios realizados sabe-se que a altura de onda está limitada em parte pela profundidade, sendo normalmente indicado como limite máximo o valor dado por  $H=0,78d$ . Na realidade, em grandes profundidades, este valor nunca é alcançado, daí que muitos autores apresentem sugestões para aquela que deve ser a altura de onda de projecto. Actualmente são bastante utilizadas a altura de onda significativa,  $H_s$ , e a altura de onda média do décimo superior,  $\bar{H}_{1/10}$ , já que a onda máxima é demasiado elevada. Estas duas alturas de onda são referidas no CEM (2006) como sugestão do Shore Protection Manual (1977 e 1984) relativamente a estruturas flexíveis ou deformáveis ( $H_s$ ) e estruturas rígidas ou flexíveis de difícil reparação ( $\bar{H}_{1/10}$ ). Estudos estatísticos acerca da agitação irregular têm mostrado que as alturas de onda significativa e média do décimo superior estão relacionadas entre si. Assim, a altura de onda máxima limitada pela profundidade pode ser expressa como  $1,76H_s$  e a altura de onda média do décimo superior como  $1,27H_s$ .

### 3.2.1. FÓRMULA DE HUDSON (WES)

Uma das fórmulas mais utilizadas no cálculo do peso dos blocos para estruturas de defesa, como esporões e quebramares, é a fórmula de Hudson (1974), resultado de estudos desenvolvidos no *Waterways Experiment Station* (WES). Esta fórmula, equação 3.25, considera apenas a altura de onda,  $H$ , o ângulo do talude,  $\alpha$ , o peso volúmico do material e da água do mar,  $\gamma_r$  e  $\gamma_w$  respectivamente, e um coeficiente  $K_D$  representativo da estabilidade dos blocos.

$$W = \frac{H^3 \gamma_r}{K_D \left( \frac{\gamma_r - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \cot \alpha} \quad (3.25)$$

O coeficiente  $K_D$  é usualmente determinado através de ensaios em modelo reduzido com agitação regular, sendo esta uma das principais críticas apontadas à fórmula, pois um só coeficiente representa vários parâmetros como a forma do bloco, a sua localização na estrutura, a permeabilidade, o embricamento, e outros. É uma falha também o facto de não ser considerada a destruição dos blocos mas apenas a sua remoção devido à agitação, pois só isso é visível nos ensaios. Além disso, este parâmetro é representativo da estabilidade com agitação regular e só existe mais um parâmetro relacionado com a agitação que é a altura de onda, deixando de fora outros factores hidrodinâmicos que influenciam as acções sobre a estrutura. A altura de onda a considerar na equação no caso de agitação irregular é a altura de onda significativa ou a média do décimo superior. No Shore Protection Manual (SPM), 1977, era indicada a utilização da altura de onda significativa, mas na edição do mesmo manual de 1984 é sugerido o recurso à altura de onda média do décimo superior,  $\bar{H}_{1/10}=1,27H_s$ , introduzindo assim um factor de segurança no dimensionamento, CEM (2006). A utilização desta altura de onda tem interesse por introduzir de certo modo a influência da agitação irregular.

Devido ao facto de ser o único parâmetro representativo da estabilidade, a escolha de  $K_D$  deve ser efectuada com cuidado por parte do projectista. No CEM (2006) existe também uma gama de valores a adoptar para este coeficiente, de acordo com o SPM, quadro 3.4. Os valores da edição de 1984 diferem dos da 1977, sendo mais conservadores, introduzindo mais uma vez uma maior margem de segurança. Além destes valores existem também valores sugeridos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), quadro 3.5, que se inserem num intervalo com maior amplitude, comparativamente com aqueles do SPM. A abordagem efectuada é visivelmente diferente já que no SPM são distinguidas as secções corrente e da cabeça, enquanto que no estudo do LNEC os valores dependem da percentagem de quedas, associadas aos estragos.

Quadro 3.4 – Coeficientes  $K_D$  da fórmula de Hudson para enrocamento (US Army Corps of Engineers, 1984).

| Tipo de blocos                | Nº de camadas | Secção Corrente              |                            | Cabeça                       |                            |
|-------------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|                               |               | Dentro da Zona de Rebentação | Fora da Zona de Rebentação | Dentro da Zona de Rebentação | Fora da Zona de Rebentação |
| Liso e arredondado            | 2             | 2,1                          | 2,4                        | 1,7                          | 1,9                        |
| Liso e arredondado            | >3            | 2,8                          | 3,2                        | 2,1                          | 2,3                        |
| Superfície áspera e irregular | 1             | -                            | 2,9                        | -                            | 2,3                        |

Quadro 3.5 – Coeficientes  $K_D$  da fórmula de Hudson para enrocamento, LNEC.

| LNEC   |            | VALORES ESTIMADOS COM BASE NOS DADOS RESULTANTES DOS ENSAIOS |      |      |
|--------|------------|--------------------------------------------------------------|------|------|
|        |            | PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA                              |      |      |
| TALUDE | QUEDAS (%) | 0,01                                                         | 0,05 | 0,10 |
| 3:2    | 0          | 0,07                                                         | 0,2  | 0,4  |
|        | 0,5        | 0,08                                                         | 0,3  | 0,5  |
|        | 1,0        | 4,1                                                          | 5,7  | 6,9  |
|        | 2,0        | 5,7                                                          | 7,7  | 9,1  |
|        | 2,5        | 6,4                                                          | 8,6  | 10,0 |
|        | 5,0        | 9,0                                                          | 11,6 | 13,2 |

Apesar da sua simplicidade, a fórmula de Hudson tem sido usada em todo o mundo para vários projectos. Com uma escolha criteriosa do coeficiente  $K_D$  e da altura de onda, esta fórmula tem-se mostrado bastante útil e conduzido a resultados aceitáveis em obra.

### 3.2.2. FÓRMULA DE VAN DER MEER

Como já foi referido, van der Meer (1988) introduziu nos seus estudos a agitação irregular, o que permite que vários aspectos da agitação passem a ser considerados no cálculo do peso dos blocos. Muitos autores continuam a recorrer a métodos mais simplistas que se baseiam ainda numa única onda representativa de toda a agitação, já que a sua acção é ainda muito desconhecida. Porém, a fórmula proposta por van der Meer é actualmente muito reconhecida. No trabalho que realizou considerou vários materiais para a constituição dos quebramares, mas neste trabalho interessam apenas os resultados relativos ao enrocamento.

Este método, além de considerar a irregularidade da agitação marítima, permite também considerar a permeabilidade da estrutura e o tipo de rebentação. O tipo de rebentação é caracterizado através do número de Iribarren, equação 3.26, comparando com o seu valor crítico, o qual depende da porosidade da estrutura, equação 3.27. Além da porosidade surgem nas expressões o ângulo do talude  $\theta$  e a declividade da onda ao largo,  $s_{op}=H/L_{op}$ .

$$\xi_m = \frac{\tan \theta}{\sqrt{s_{op}}} \quad (3.26)$$

$$\xi_{mc} = (6,2P^{0,31}\sqrt{\tan \theta})^{\frac{1}{(P+0,5)}} \quad (3.27)$$

O parâmetro P da equação 3.27, representativo da porosidade, é definido de acordo com a constituição da estrutura, consoante esta possua manto resistente e filtros ou apenas manto resistente, da dimensão dessas camadas, e das características dos filtros, figura 3.14.

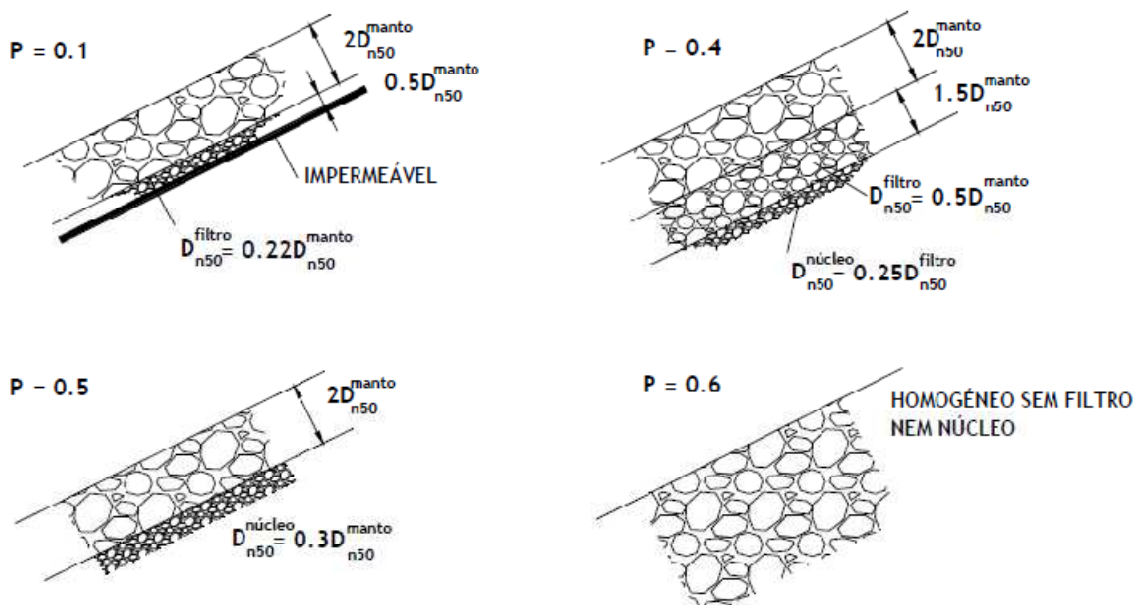


Fig. 3.14 - Factor de permeabilidade, P, para vários tipos de situações, van der Meer, 1988 (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2006).

Assim, através das equações 3.28 e 3.29 é possível calcular o peso dos blocos para situações de rebentação mergulhante ou basculante e do tipo oscilatória, respectivamente, aplicáveis a taludes não galgáveis em grandes profundidades ( $d > L_0/2$ ). No tipo mergulhante a rebentação tem forte impacto e inclui fenómenos de grande turbulência, enquanto a rebentação oscilatória, que inicialmente se assemelha à anterior, ocorre de forma mais suave, visto que o colapso se dá antes da formação da voluta. As restantes variáveis a utilizar nestas expressões são o nível de estragos admitidos,  $S$ , o número de ondas  $N_z$  da tempestade considerada, que está limitado a 7500, e a densidade relativa dos blocos  $\Delta = \frac{\gamma_r - \gamma_w}{\gamma_w}$ .

$$\frac{H_{proj}}{\Delta D_{n50}} = 6,2 P^{0,18} \left( \frac{S}{\sqrt{N_z}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5}, \quad \xi_m < \xi_{mc} \quad (3.28)$$

$$\frac{H_{proj}}{\Delta D_{n50}} = 1,0 P^{-0,13} \left( \frac{S}{\sqrt{N_z}} \right)^{0,2} \sqrt{\cot \theta} \xi_m^P, \quad \xi_m > \xi_{mc} \quad (3.29)$$

O nível de estragos,  $S$ , é caracterizado pelo número de blocos deslocados ou removidos da sua posição original. No quadro 3.6 são sugeridos alguns valores recomendáveis para este parâmetro.

Quadro 3.6 – Valores do parâmetro  $S$  recomendáveis, para mantos resistentes constituídos por duas camadas de enrocamento, van der Meer, 1988 (Taveira Pinto, 2003).

| 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 – 1/6            | 3                 | 8 – 12               | 17    |

Para a aplicação a estruturas galgáveis, van der Meer (2003) recomenda a utilização de um factor de redução,  $R_p$ , aos valores dos diâmetros nominais anteriormente calculados por métodos empíricos para quebramares não galgáveis. A determinação deste coeficiente é efectuada pela equação 3.30, na qual entram parâmetros já habituais como a altura de onda significativa, a diferença entre o nível da água e a cota de coroamento e a declividade da onda através do parâmetro  $R_p^*$ , equação 3.31.

$$R_p = (1.25 - 4,8 R_p^*)^{-1} \quad (3.30)$$

$$R_p^* = \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_m}{2\pi}} \quad (3.31)$$

A expressão 3.30 só é válida quando  $R_p^*$  se situa entre 0 e 0,052, impondo assim que o factor redutivo da  $R_p$  se situe entre 0,8 e 1.

No caso de quebramares submersos, van der Meer (2003) propõe uma abordagem diferente da descrita para quebramares galgáveis. Neste caso a estabilidade da estrutura pode ser determinada pelo parâmetro de altura de onda adimensional,  $N_s$ , equação 3.32, ou pelo parâmetro de estabilidade espectral,  $N_s^*$ , que se relacionam através da equação 3.33. O diâmetro médio dos blocos poderá então ser calculado a partir destes valores, já que sendo  $N_s$  o parâmetro de altura de onda adimensional é igual ao quociente entre a altura de onda e o produto da densidade relativa dos blocos pelo diâmetro  $D_{n50}$ .

$$N_s = -7 \ln \left( \frac{1}{2,1 + 0,1S} \frac{h}{d} \right) \sqrt[3]{s_{op}} \quad (3.32)$$

$$N_s^* = \frac{N_s}{\sqrt[3]{s_{op}}} \quad (3.33)$$

O nível de estragos foi avaliado por Pilarczyk (2003) e relaciona-se com o quociente entre a altura da estrutura e a profundidade de água local, já que a inclinação do talude não é tida em conta neste caso.

### 3.2.3. FÓRMULA DE POWELL E ALLSOP

Os estudos de Powell e Allsop (1985) foram direccionados também no sentido de encontrar expressões analíticas que permitissem o cálculo do diâmetro médio dos blocos a colocar no manto resistente. O factor ao qual é atribuída mais importância é o nível de estragos. Este parâmetro é definido como a percentagem de blocos removidos da sua posição original, ou seja, a relação entre o número de unidades deslocadas e o número total de unidades existentes no manto resistente,  $N_e/N_a$ .

Powell e Allsop (1985) apresentaram curvas de estragos associados a dois tipos de regimes de ondas e ao grau de submergência, resultantes de ensaios em laboratório. Os regimes de ondas considerados foram diferenciados pela relação  $H_s/L_{op}$ , sendo que para ondas longas  $H_s/L_{op} \geq 0,03$  e para ondas curtas  $H_s/L_{op} \leq 0,03$ . Para ondas curtas a relação  $R_c/d$  deverá igualar os valores 0,23, 0,38 ou 0,57, e para ondas longas 0,29, 0,39 ou 0,57.

Através dessas curvas, é possível determinar os parâmetros A e B que, juntamente com o nível de estragos admitido, permite encontrar o valor do parâmetro de altura de onda adimensional, equação 3.34. Consequentemente é possível calcular o valor do diâmetro médio dos blocos do manto resistente através da equação 3.35.

$$\frac{N_e}{N_a} = A e^{B N_s} \quad (3.34)$$

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (3.35)$$

Como, quando é conhecido o regime de ondas, são automaticamente conhecidos os parâmetros A e B, pode-se resumir as curvas apresentadas nas equações 3.36 e 3.37, para ondas longas e ondas curtas respectivamente. Uma vez que a relação  $N_e/N_a$  é previamente escolhida, a expressão 3.34 resume-se a uma única incógnita.

$$\frac{N_e}{N_a} = 0,028e^{2,25N_s} \quad (3.36)$$

$$\frac{N_e}{N_a} = 0,008e^{2,31N_s} \quad (3.37)$$

Powell e Allsop apresentam assim uma metodologia de dimensionamento baseada apenas no nível de estragos e em características da estrutura, sendo a única referência à agitação introduzida pela altura de onda. Comparativamente com as expressões apresentadas anteriormente, verifica-se que tal como Hudson, Powell e Allsop abordam a agitação como agitação regular, sendo apenas considerado um parâmetro a ela associada. Porém, tentaram incluir na sua análise a acção da agitação irregular através do período de onda, de forma a melhorar a qualidade dos resultados.

Para isso apresentaram novas curvas de estragos associadas mais uma vez aos regimes de ondas longas e curtas e ao grau de submergência, mas agora em função do parâmetro de estabilidade espectral,  $N_s^*$ , equação 3.38. A principal diferença é a utilização da declividade da onda,  $s_{op}$ , em função de  $L_{op}$ , ou seja  $s_{op}=H_s/L_{op}$ . É assim introduzido o período de onda, pois o comprimento de onda ao largo ( $L_{op}$ ) é directamente proporcional ao quadrado do período de onda. Então, tal como no caso anterior, através das curvas caracterizadas pelos parâmetros A e B do quadro 3.7 é determinado o valor de  $N_s^*$  e através das equações 3.34 e 3.38 o valor do diâmetro médio dos blocos.

$$N_s^* = \frac{\sqrt[3]{H^2 L_{op}}}{\Delta D_{n50}} \quad (3.38)$$

Quadro 3.7 – Parâmetros A e B para a expressão 3.34, para agitação irregular

| Regime de ondas | $R_c/d$          | A      | B    |
|-----------------|------------------|--------|------|
| Ondas longas    | 0,29             | 0,0007 | 1,66 |
|                 | 0,39             | 0,0018 | 1,58 |
|                 | 0,57             | 0,0009 | 1,92 |
| Ondas curtas    | 0,23; 0,38; 0,57 | 0,0059 | 1,07 |

### 3.2.3. FÓRMULA DE VIDAL ET AL.

Com o intuito de diferenciar a estabilidade dos blocos consoante as várias secções de um quebramar destacado de taludes, Vidal *et al.* (2001) realizaram ensaios em estruturas de baixa cota de coroamento. A análise foi efectuada para a secção corrente (TS) e para a cabeça da estrutura tendo sido cada uma delas subdividida, de forma a avaliar os danos separadamente. Resultaram cinco

secções diferentes, nomeadamente cabeça anterior (FH), cabeça posterior (BH), talude anterior (FS), talude posterior (BS) e coroamento (C), figura 3.15. O modelo tinha o talude anterior e posterior com inclinações 2:1 e 3:2, respectivamente, as ondas não eram limitadas pela profundidade e o coroamento tinha uma largura de  $6D_{n50}$ .

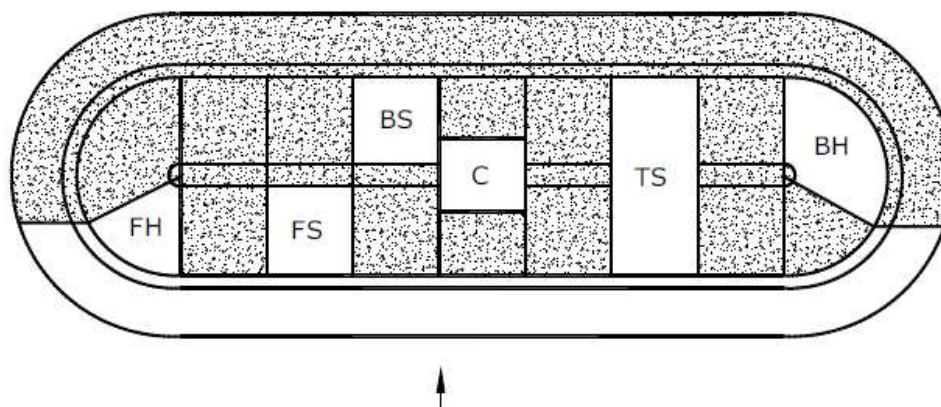


Fig.3.15 – Secções consideradas no dimensionamento de um quebra-mar de baixa cota de coroamento, Vidal *et al.*, 2000 (Pereira 2008).

Vidal *et al.* (2000) concluíram que o coroamento da secção corrente é a secção menos estável nos casos de quebramares submersos e a cabeça do lado de sotamar é menos estável em condições emersas. Isto é compreensível já que o coroamento está mais sujeito à agitação num quebra-mar submerso devido aos galgamentos, e a cabeça, devido à difracção é bastante exposta, sendo uma zona de concentração de energia.

No estudo realizado foram produzidas curvas de estragos para cada secção em função da altura adimensional de água acima do coroamento,  $F_d$ , igual ao quociente entre a altura de água acima do coroamento e o diâmetro médio dos blocos. Para Vidal *et al.* (2001) o nível de estragos corresponde ao início dos estragos, por razões relacionadas com a segurança. As curvas são definidas pela equação 3.39 cujas constantes se encontram no quadro 3.8.

$$N_s = A + BF_d + CF_d^2 \quad (3.39)$$

Quando 3.8 – Constantes A, B e C a considerar nas curvas de estragos (Pereira, 2008).

| Secção                | A      | B       | C      |
|-----------------------|--------|---------|--------|
| Talude anterior (FS)  | 1,831  | -0,245  | 0,0119 |
| Talude posterior (BS) | 2,257  | -0,54   | 0,115  |
| Coroamento (C)        | 1,62   | 0,0182  | 0,159  |
| Cabeça anterior (FH)  | 1,681  | -0,474  | 0,105  |
| Cabeça posterior (BH) | 1,6018 | -0,2592 | 0,0731 |

Considerando que o nível de estragos estará entre 0,5 e 1,5 o valor de  $N_s$  é limitado, já que a expressão só é válida quando  $-2,01 \leq F_d \leq 2,41$ , como se confirma na figura 3.16.

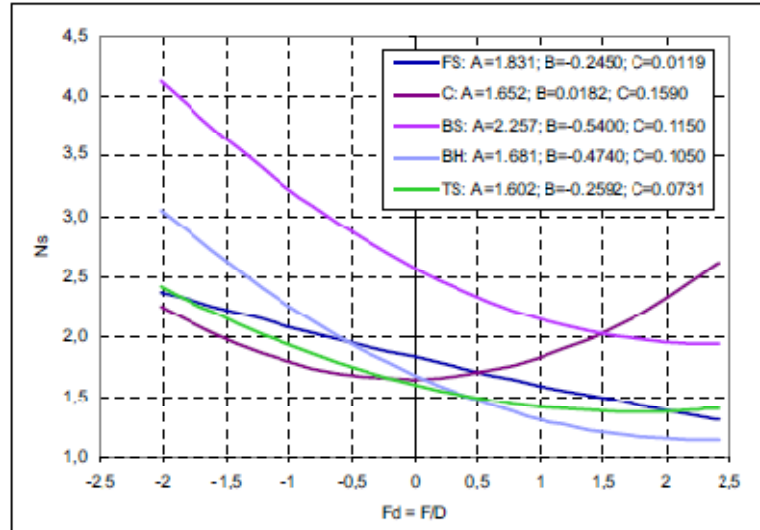


Fig. 3.16 – Relações de estabilidade para o dimensionamento das diferentes zonas de um quebramar destacado de baixa cota de coroamento, Vidal *et al.*, 2000 (Pereira 2008).

Para começar o processo de determinação dos pesos dos blocos, consoante a sua localização no quebramar, é calculado o diâmetro médio,  $D_{\infty 1}$ , para uma estrutura em tudo semelhante, mas não galgável, através de uma fórmula previamente seleccionada. Com esse valor é determinado o valor do diâmetro médio dos blocos do manto resistente do talude anterior, através da equação 3.40, em que o número de estabilidade,  $N_{sFS}(F_{d1})$ , é determinado pela equação 3.39 com  $F_{d1}$  igual ao quociente entre a altura livre acima do nível da água e o diâmetro  $D_{\infty 1}$ . O valor de  $N_{sFS\infty}$  é aquele que corresponde ao valor limite máximo de  $N_s$ .

$$D_{FS1} = D_{\infty 1} \frac{N_{sFS\infty}}{N_{sFS}(F_{d1})} \quad (3.40)$$

Posteriormente é determinado o diâmetro relativo aos blocos do coroamento com base no valor de  $D_{FS2}$ , pelo mesmo processo, sendo que  $F_{d2}$  será o quociente entre a mesma altura livre acima do nível de água e  $D_{\infty 2}$  considerando-se agora a inclinação de 3:2 em vez de 2:1. É utilizada novamente a equação 3.40, porém com o índice 2 substituindo o 1. Então, para encontrar o valor do diâmetro médio do coroamento, é utilizada a equação 3.41, sendo agora  $F_{d3}$  igual a  $R_c/D_{FS2}$ , que leva à definição de  $N_{sFS}(F_{d3})$  e  $N_{sC}(F_{d3})$ .

$$D_C = D_{FS2} \frac{N_{sFS}(F_{d3})}{N_{sC}(F_{d3})} \quad (3.41)$$

Ainda na secção corrente, para o talude posterior o cálculo efectua-se com a equação 3.42, de novo com base no valor de  $D_{FS2}$ .

$$D_{BS} = D_{FS2} \frac{N_{sFS}(F_{d3})}{N_{sBS}(F_{d3})} \quad (3.42)$$

Relativamente ao diâmetro médio da cabeça posterior, ele é determinado pelo mesmo processo. Inicialmente calcula-se, pela mesma fórmula de estabilidade, o valor do diâmetro para uma estrutura não galgável,  $D_{H\infty}$ , ou é majorado o valor de  $D_{\infty1}$  de modo a determinar  $D_{H\infty}$ . Então, através de  $F_{d4}$ , que tem em denominador o diâmetro calculado de  $D_{H\infty}$ , é definido  $N_{sBH}(F_{d4})$  e recorrendo à equação 3.43 é encontrado o valor do diâmetro médio dos blocos para a cabeça posterior.

$$D_{BH} = D_{BH\infty} \frac{N_{sBH\infty}}{N_{sBH}(F_{d4})} \quad (3.43)$$

Finalmente, para a cabeça anterior o diâmetro dos blocos será igual ao da cabeça posterior. Por simplificação escolheu-se não diferenciar a região anterior e posterior das cabeças.

### 3.3. PERFIL TRANSVERSAL TIPO

#### 3.3.1. CAMADAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL

Até aqui foi exposto como determinar a dimensão dos blocos, mas interessa também seleccionar as características dos blocos das sub-camadas, já que estas funcionam como fundação ao manto resistente e ao mesmo tempo como protecção do núcleo.

Os pesos dos blocos pertencentes a essas camadas podem ser determinados com base nas indicações do CEM (2006), pois estes estão relacionados com o peso dos blocos do manto resistentes  $W$ . A figura 3.17 retirada do CEM explicita os pesos das sub-camadas e da risberma. Apesar disso é necessário dar atenção especial à risberma, já que é muito solicitada, podendo a sua rotura conduzir à ruína de toda a estrutura. O núcleo é usualmente composto por material de todo o tamanho (TOT).

No caso de quebramares destacados devem ser seguidas algumas indicações relativamente à espessura das camadas, tal como o número de fiadas de blocos em cada camada. Para o manto resistente têm sido usadas duas fiadas para os blocos convencionais de enrocamento, tetrápodes, blocos antifer, apesar de existirem blocos que podem ser aplicados com só uma fiada, embora a segurança nesses casos ainda não seja muito aceite devido a alguns acidentes ocorridos. Então, para um quebramar destacado é usual adoptar 2 a 3 camadas no manto resistente, 2 a 4 na primeira sub-camada e caso se verifique a segunda sub-camada, 2 a 3 fiadas.

A espessura de cada camada é então definida como o produto do número de fiadas pela dimensão característica dos blocos. A dimensão característica, equação 3.44, que, como se pode facilmente perceber, resulta de se considerar a forma cúbica para cada bloco cujo volume é a potência cúbica do diâmetro, e que também pode ser encontrado dividindo o peso unitário pelo peso volúmico do material. Como a forma não é cúbica, é introduzido um coeficiente  $K_{\Delta}$  representativo da forma dos blocos a utilizar.

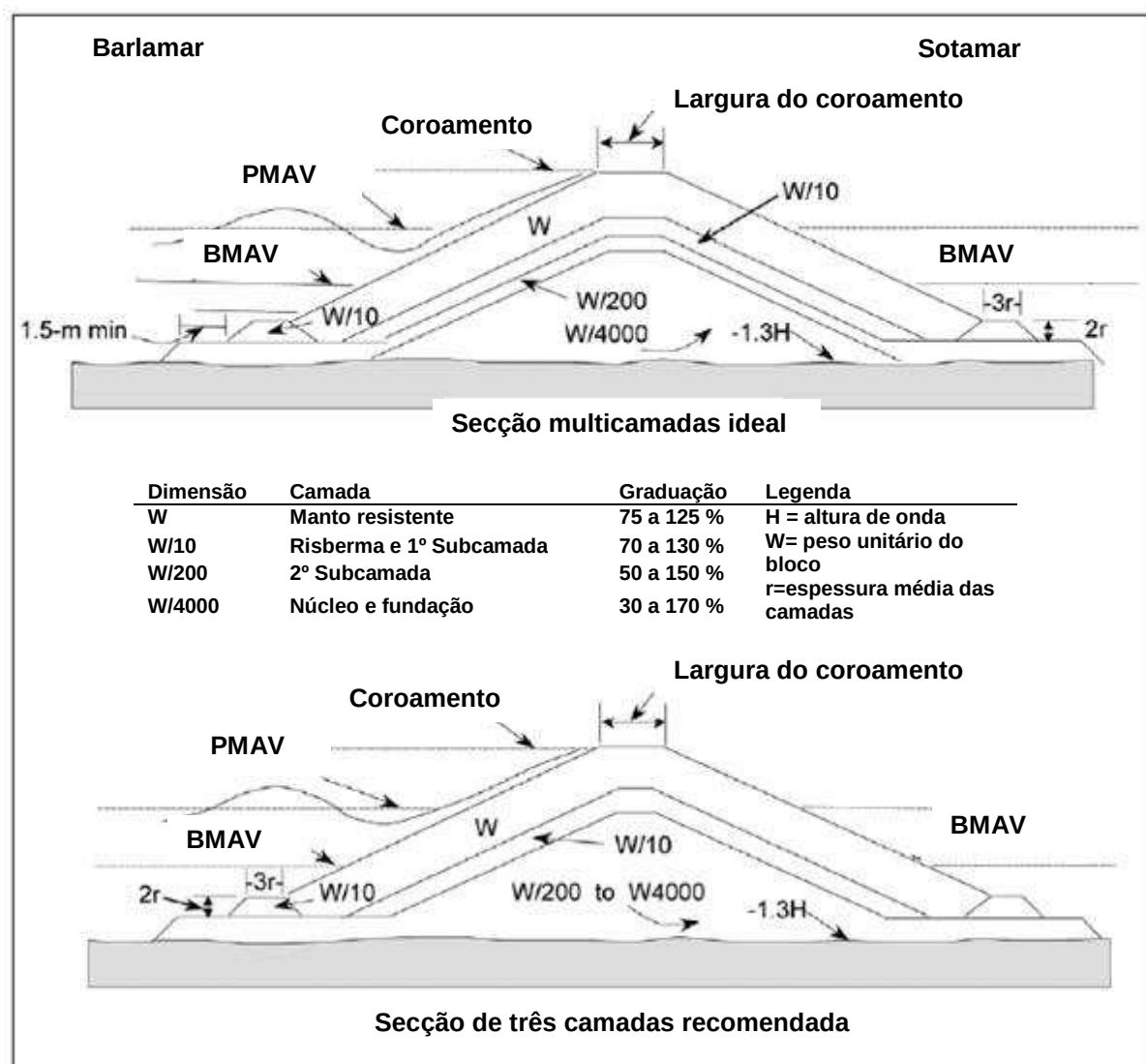


Fig.3.17 – Secção transversal de um quebramar de taludes (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2006).

$$e = K_{\Delta} \left( \frac{W}{\gamma_r} \right)^{1/3} \quad (3.44)$$

Relativamente à largura do coroamento, esta deve garantir a boa circulação dos veículos na fase de construção, podendo ser 4m se não houver cruzamento de veículos, ou 7m se houver necessidade de circularem dois veículos em simultâneo. Se a largura necessária para o efeito desejado for menor e não permitir a circulação de dois veículos é possível recorrer apenas a alargamentos localizados para que se efectue o cruzamento de veículos.

### 3.3.2. FUNDAÇÃO

A fundação tem grande importância no desempenho da estrutura, já que a protege de fenómenos de infra-escavação, prevenindo a ruína do quebramar. A rotura pode ser causada por várias razões, desde falhas no projecto, falhas na construção ou por razões mais naturais como as acções sobre a estrutura.

No sentido de garantir segurança, tem sido dada atenção à definição da fundação. Esta pode ser materializada por colocação de geossintéticos servindo para efectivar a separação dos fundos da estrutura, e também como filtro e dreno. Quando utilizado em fundos móveis garante o não arrastamento dos finos junto do pé do talude, melhorando a estabilidade da estrutura. A utilização de geossintéticos impede também que os materiais do fundo e o material do núcleo se misturem o que pode ser indesejável se um for granular e o outro fino, pois haveria alterações na resistência dos materiais e poderiam ocorrer fenómenos de liquefacção, levando ao deslize do talude (Pereira, 2008).

Têm sido procuradas outras soluções que apresentem vantagens face à segurança da fundação. No fundo todas elas procuram que haja estabilidade da estrutura e que sejam diminutas as erosões na base da estrutura. Uma das possíveis soluções é a aplicação de uma malha em polipropileno com cubos de betão que pode ser usada em médias e grandes profundidades. Uma vez que os blocos de betão são pré-fabricados, estas grelhas são de fácil execução. O seu funcionamento passa por dar maior resistência ao solo de fundação e impedir que o enrocamento TOT se dissipe no fundo arenoso.

Uma outra solução, mais usada, é a aplicação de camadas de enrocamento de modo a proteger a base e as risbermas, principalmente nos locais mais expostos à agitação. Quando correctamente utilizada, esta solução permite minimizar a erosão na fundação.



# 4

## CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO: FRENTE MARÍTIMA DA FOZ DO DOURO NO PORTO

### 4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE INTERVENÇÃO

#### 4.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Com uma população de 240000 habitantes, e uma área de 41,66km<sup>2</sup>, a cidade do Porto é a segunda maior cidade de Portugal, e a capital da segunda maior área metropolitana, que no total tem cerca de um milhão e meio de habitantes.

Pela forte dependência do rio, com o tempo, o desenvolvimento da cidade passou em parte pelo desenvolvimento das zonas ribeirinhas. Próximo da ponte D. Luiz I encontra-se a Alfândega, o Palácio da Bolsa, além de casas antigas e lojas, que cresceram junto do porto do Douro. Mais perto da foz existem também vestígios da actividade da população ribeirinha, onde se localizavam os portos de pesca e existiam antigos armazéns de apoio as actividades burguesas. Assim ao longo dos anos as freguesias junto à foz do rio Douro e às praias foram crescendo.

A zona onde se pretende estudar a construção de um sistema de quebramares destacados pertence às freguesias de Nevogilde e Foz do Douro. Estas freguesias têm grandes diferenças na sua história e no seu desenvolvimento. Nevogilde foi terra de campos e agricultura até tarde, enquanto a Foz, estando muito próxima do Rio Douro, se desenvolveu associada ao porto do Douro. É fácil distinguir visualmente a Foz Velha da Foz Nova, mas a sua história não se pode contar em separado.

A cidade do Porto sempre viveu com grande ligação ao mar e ao rio. Apesar de a Foz só no século XIX ter sido integrada na cidade do Porto, sempre foi terra de povo trabalhador ligado ao campo e ao mar, embora extremamente ligado com a cidade. Por isso muitos moradores ainda usam a expressão “ir ao Porto” quando se deslocam ao centro da cidade. Com a evolução dos transportes, no século XIX, a Foz fica mais perto da cidade, e é por essa altura que começa a surgir a Foz Nova. É aí que muitos seguem as indicações médicas e vão a banhos junto ao molhe de Carreiros, e muitos burgueses vão passar as suas férias e dar os seus passeios de fim-de-semana, já que ainda no século XIX é inaugurado o jardim do Passeio Alegre. Em parte, estes hábitos foram introduzidos pelos ingleses que moravam na cidade, perpetuada pela existência da Praia dos Ingleses.

Só mais perto do final do século é que as primeiras famílias escolhem a Foz Nova como local de residência permanente. Muitos eram aqueles que admiravam a coragem dos que se instalavam junto ao mar agitado do Inverno. Apesar disso, as casas da classe rica iam surgindo, bem como ruas largas e elegantes, incluindo a Estrada de Carreiros (actualmente avenidas Brasil e Montevideu), figuras 4.1 e

4.2, condizentes com as casas de um ou dois pisos, por onde o Americano (meio de transporte colectivo do século XIX) fazia a ligação das cidades do Porto e Matosinhos.



Fig. 4.1 – Estrada de Carreiros  
(<http://www.jf-nevogilde.pt/>).



Fig. 4.2 – Avenida do Brasil, Pérgola  
(<http://diasquevoam.blogspot.com/>).

Já no século XX a Foz continua a ser um local de eleição, e muitos assemelham a Foz, no Porto, com Cascais em Lisboa. Mas, na realidade, as tradições não se perderam porque apesar do porto fluvial se ter transferido para Leixões ainda há muitos pescadores a viverem na freguesia da Foz. Tratando-se de uma terra de povo simples e acolhedor onde se instalam alguns “doutores” que vão enriquecendo e pretendem passar uma imagem de elite no Porto, igual à existente na capital. Mas é essa mistura de ricos e pobres, antigo e moderno, que faz a cidade do Porto atraente para muitos turistas que todos os anos a visitam, não deixando nunca de conhecer a orla marítima.

Nos anos 80 surgem vários cafés e esplanadas nas avenidas do Brasil e Montevideu continuando a ser uma zona de eleição para passeios à beira-mar e de residência para os mais abastados. Cada vez mais esta parte da cidade é frequentada apenas por aqueles que vão passear ao fim da tarde, ao fim de semana, quer para usufruir das praias, quer para caminhar com aquela bela paisagem de fundo.

A zona em estudo está inserida, como já referido pertence às freguesias da Foz do Douro (Foz velha) e de Nevogilde (Foz Nova). Na primeira encontram-se casas e prédios antigos, essencialmente para habitação e algum comércio, na outra existem prédios de habitação de luxo, casas apalaçadas onde em tempos viverem famílias ricas, agora transformadas, algumas delas, em restaurantes, lojas, clínicas e outros serviços.

Quem pretende visitar a cidade do Porto, e conhecer a marginal e as praias poderá encontrar, além do já referido jardim do Passeio Alegre, alguns locais históricos, como os fortes de S. João Baptista e S. Francisco Xavier (Castelo do Queijo), figura 4.3. Estes foram construídos com o objectivo de defesa militar da cidade. À medida que a sua utilidade foi diminuindo já passaram por variados usos, principalmente o Castelo do Queijo que desde que foi ocupado pelos apoiantes de D. Miguel aquando da revolução liberal nunca mais voltou a ser utilizado com o mesmo propósito. Passou de novo por propriedade militar mas acabou por ser abandonado, para mais tarde ser usado pela Junta de Freguesia de Nevogilde, mas acabou por passar para propriedade da Câmara Municipal do Porto e ser recuperado aquando do Porto 2001.

Na figura 4.3 são visíveis algumas das diferenças notando-se mais à direita uma maior irregularidade das ruas e maior densidade de construções, que vão diminuindo para a esquerda, na direcção da Avenida da Boavista.



Fig. 4.3 – Localização de alguns pontos de interesse na frente marítima da Foz do rio Douro.

#### 4.1.2. AS PRAIAS DA CIDADE DO PORTO

Como é de conhecimento geral, o mar na costa norte de Portugal possui uma agitação muito forte e energética. Assim se entende que a zona em estudo tenha sido afectada pela sua acção, notando-se que, apesar de estas praias possuírem grande afluência de população, não têm uma grande quantidade de areia. Alguma da areia que consegue ser transportada de Norte não se deposita aqui, sendo transportada para Sul pelas correntes existentes. São praias com muitos afloramentos rochosos ao abrigo dos quais se têm instalado vários equipamentos. No século XIX foram realizadas várias obras para a protecção da costa marítima da cidade do Porto, maioritariamente no que diz respeito à barra do rio Douro, como os molhes de Felgueiras e do Touro, a meia-laranja, o aterro que deu origem ao jardim do Passeio Alegre, e também o molhe de Carreiros, figura 4.4. Todos estes trabalhos, resultado de estudos dirigidos pelo Engenheiro Afonso Soares, foram realizados entre 1873 e 1892 e tinham como objectivo melhorar a barra do Douro

Apesar da localização destas praias entre molhes e fundos rochosos, os moradores confirmam que em invernos mais rigorosos é normal a água do mar atingir a rua, e mesmo as casas em frente à praia dos ingleses. Ainda no passado mês de Janeiro, o mar atingiu a calçada pedonal junto à praia de Gondarém, onde um homem passeava o seu cão e foi arrastado por uma onda que lhe “pregou uma rasteira” (Jornal de Notícias, 01/2009).

Por isso ao longo do século XX houve várias alterações nas avenidas Montevideu e Brasil. Uma dessas obras foi a elevação da cota da estrada marginal, para impedir que o mar atingisse as casas, figuras 4.5 e 4.6.



Fig.4.4 – Molhe de Carreiros, 2009.



Fig.4.5 – Praia dos Ingleses antes da elevação da cota da estrada (<http://jf-fozdodouro.pt/>).



Fig.4.6 - Praia dos Ingleses  
(<http://portodocrime.blogspot.com>)

## 4.2. CARACTERÍSTICAS E CONDICIONANTES DO LOCAL DE INTERVENÇÃO

Na costa Norte de Portugal, a agitação marítima é, como foi referido, bastante energética, sendo mesmo considerada a mais energética da costa portuguesa.

Pereira, 2008, apresenta um estudo com o objectivo de determinar as características da agitação na costa da cidade de Espinho. Pelo facto de nesse estudo terem sido usados dados do porto de Leixões e pela proximidade entre Espinho e Porto foram utilizados os resultados do estudo anteriormente referido.

Nesse estudo foram utilizados dados relativos aos anos de 1993 a 2006 registados em Leixões, apesar de nalguns anos os registos não serem completos.

As marés astronómicas, na costa portuguesa, têm amplitudes de cerca de 4.0 m e são semi-diurnas. No dimensionamento de estruturas marítimas não é tido em conta a ocorrência de marés meteorológicas,

sendo que só haverá perigo se estas se verificarem no momento da estofa da preia-mar. O quadro 4.1 apresenta alguns dados relativos às marés usuais em Portugal.

Quadro 4.1 – Elementos relativos às marés (Pereira, 2008)

|           | MARÉS                   | COTAS (m)<br>(Z.H.) |
|-----------|-------------------------|---------------------|
| Preia-mar | Máxima Excepcional      | +4.04               |
|           | Viva média              | +3.42               |
|           | Média                   | +2.96               |
|           | Morta                   | +2.00               |
| Baixa-mar | Máxima                  | +2.00               |
|           | Média                   | +0.90               |
|           | Viva Média              | +0.50               |
|           | Viva Mínima Excepcional | -0.20               |

A caracterização do clima de agitação deve ser efectuada com base nos parâmetros altura de onda significativa,  $H_s$  ou  $H_{M0}$ , período de onda médio,  $T_{02}$ , período de pico,  $T_p$ , e direcção média do período de pico, THTP (Pereira, 2008).

#### 4.2.1. ALTURA DE ONDA

Como já referido no capítulo anterior, num projecto de obras marítimas a definição da altura de onda a usar deve ser feita de modo criterioso. Uma primeira abordagem está relacionada com a profundidade de implantação,  $d$ , que influencia a altura de onda máxima a verificar no local, ou seja  $H=0,78d$ . O valor da altura de onda de projecto deverá ser considerado de forma a não serem adoptados valores por defeito, já que isso poderia por em perigo a durabilidade da estrutura face à agitação incidente. Para isso deverá ser efectuado um estudo estatístico baseado nos dados disponíveis.

Pereira (2008) refere que os períodos de temporal correspondem a alturas de onda significativas,  $H_{m0}$ , superiores a 4,5m, sendo que em Leixões se verificou uma altura de onda máxima de 8,52m, ocorrida no ano de 2006.

Efectuando uma análise estatística é possível determinar várias alturas de onda características, como a altura de onda significativa, excedida 12h por ano, e outras. Apresenta-se de seguida um resumo de dois estudos efectuados em 2008 com base nos dados do porto de Leixões, Pereira (2008) e Silva *et al.* (2008).

Para o dimensionamento de uma estrutura semelhante em Espinho, Pereira (2008) determinou a altura de onda significativa,  $H_s$ , a altura de onda excedida 12 horas por ano,  $H_{012}$ , a altura de onda correspondente à média das 5 mais altas alturas de onda em águas profundas durante um ano,  $H_{05}$ , a altura de onda média do décimo superior,  $\bar{H}_{1/10}$ , quadro 4.2.

Para a determinação da altura de onda excedida 12 horas por ano é necessário conhecer a altura de onda média quadrática,  $H_{rms}$ . Então pela equação 4.1, baseada na distribuição de Rayleigh, é possível encontrar o valor de  $H_{012}$ , para cada ano.

$$H_{012} = \sqrt{\ln(1/p)} H_{rms} \quad (4.1)$$

Sendo a probabilidade deste parâmetro ser excedido de 0,14% o valor de  $H_{012}$  será 8,0m.

Quadro 4.2 – Valores das alturas de onda características (Pereira, 2008)

| $H_s$ | $H_{012}$ | $H_{05}$ | $H_{1/10}$ | $H_{m\acute{a}x}$ |
|-------|-----------|----------|------------|-------------------|
| 4,40  | 8,00      | 7,14     | 5,59       | 8,52              |

Excepto para situações em que é necessária a aplicação de determinada altura de onda, será correcto adoptar como onda de projecto a onda média do décimo superior, conforme sugerido no CEM.

Silva *et al.* (2008) com base também em registos do porto de Leixões de 1993 a 2007 com o objectivo de determinar a profundidade de fecho, calculou a altura de onda mediana e a que é excedida 12h/ano.

Admitindo uma distribuição exponencial modificada para a altura de onda significativa é possível relacionar a altura de onda excedida 12h/ano com a altura de onda significativa e com o desvio padrão  $\sigma_s$ , equação 4.2

$$H_{012} = H_s + 5,6\sigma_s \quad (4.2)$$

No mesmo estudo é referida também a equação 4.3 que relaciona a altura de onda significativa com a altura de onda mediana, com os mesmos pressupostos do caso anterior.

$$H_{s50} = H_s - 0,3\sigma_s \quad (4.3)$$

Silva *et al.* (2008) apresenta como alturas de onda características ao largo de Leixões os valores do quadro 4.3, resultado de uma extrapolação da distribuição de *Gumbel*, ajustada pelo método dos mínimos quadrados. O desvio padrão obtido foi de 1,02m e o período de 9,30s. Os resultados obtidos pelas equações 4.2 e 4.3 deram origem a um melhor ajuste.

Quadro 4.3 – Valores das alturas de onda características (Silva, 2008).

|                              | $H_{012}$ | $H_{s50}$ |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Método dos mínimos quadrados | 6,64      | 1,20      |
| Hallermeier                  | 7,60      | 1,58      |

Confirma-se que o resultado encontrado por Pereira (2008) é aceitável já que não difere muito daquele que se obtém seguindo a metodologia de Hallermeier, verificando-se uma diferença de apenas 5%, justificada pelo número de dados efectivamente utilizados em função das lacunas verificadas.

#### 4.2.2. PERÍODOS DE ONDA

Com base nos registos de Leixões, para alturas de onda significativas entre 1 e 2 metros verificam-se períodos que variam de 10 a 13 segundos, podendo chegar aos 15 segundos para alturas de onda superiores. Pereira (2008) refere que segundo o IHRH, os dados do início da década de 90 indicam que a altura de onda significativa máxima é de 9m, correspondendo-lhe um período de aproximadamente 10s.

Tal como para as alturas de onda, Pereira (2008) determinou os períodos de onda a utilizar em diversos métodos de dimensionamento. Assim, nesse estudo estão presentes os períodos correspondentes às alturas de onda  $H_{05}$ ,  $H_{012}$  e o período de pico,  $T_p$ .

Para cada ano, e para o cálculo do período  $T_{012}$ , Pereira (2008) utilizou a fórmula de Bretschneider (1959), equação 4.4, que relaciona o mesmo com o período de pico médio anual e a probabilidade de ocorrência.

$$T_{012} = T_p \left( \frac{\ln p}{-0.675} \right)^{1/4} \quad (4.4)$$

Deste modo, apresenta-se no quadro 4.4 os valores médios a usar no projecto.

Quadro 4.4 – Períodos de onda (Pereira, 2008).

| $T_p$ | $T_{012}$ | $T_{05}$ |
|-------|-----------|----------|
| 11,2  | 19,8      | 15,3     |

Ainda relacionado com o período de pico é possível associar-lhe uma direcção média. Os dados de Leixões indicam que entre 2001 e 2002 as direcções predominantes variavam entre NW e WNW, figura 4.7.

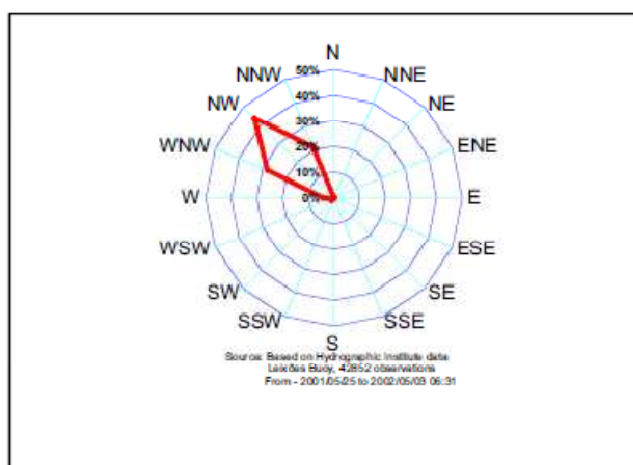


Fig. 4.7 – Frequência da direcção das ondas registadas na bóia de Leixões (Pereira, 2008).

### 4.3. GEO-MORFOLOGIA DA COSTA

A frente marítima da cidade do Porto encontra-se parcialmente protegida por dois esporões, o molhe de Felgueiras a sul junto à barra do rio Douro e o molhe de Carreiros a norte, representando aproximadamente um terço da linha de costa compreendida entre o rio Douro e o porto de Leixões, com 1,5km de extensão. Além disso existem vários afloramentos rochosos nessas praias, constituídos por gnaisses que, segundo o Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, tem uma idade mínima de 580 milhões de anos, Jornal de Notícias (2005).

O comportamento das ondas é influenciado tanto pelos molhes como pelas rochas presentes, não só as que são visíveis à superfície como também por aquelas que se encontram parcial ou totalmente submersos. Por isso o transporte sedimentar nesse pequeno troço da costa é de difícil caracterização.

#### 4.3.1. TOPOGRAFIA E BATIMETRIA

A cidade do Porto insere-se no final do vale do rio Douro, daí possuir uma grande variação na sua topografia. Grande parte da cidade situa-se a cotas mais elevadas, desenvolvendo-se para cotas inferiores junto do rio e do mar, com inclinações maiores junto do rio do que na frente marítima.

No levantamento batimétrico utilizado, datado de 2002, anexo A1, é visível a irregularidade dos fundos nas praias da cidade. Alguns dos maciços rochosos aí existentes são visíveis mesmo durante a preia-mar. Estas características restringem-se apenas a um pequeno troço já que a cidade de Matosinhos, imediatamente a norte, possui uma topografia bastante mais plana e regular, sendo que nessas praias se existe um maior volume de areia. De certo modo este facto é devido à existência do Porto de Leixões.

Com o auxílio do programa *ArcGIS* foram efectuados perfis transversais da praia, de 50 em 50 metros, anexo A2. Na figura 4.8 estão representados três desses perfis, um próximo do Molhe de Carreiros (perfil 4), outro na zona central (perfil 19) e por fim um junto do Molhe de Felgueiras (perfil 28).

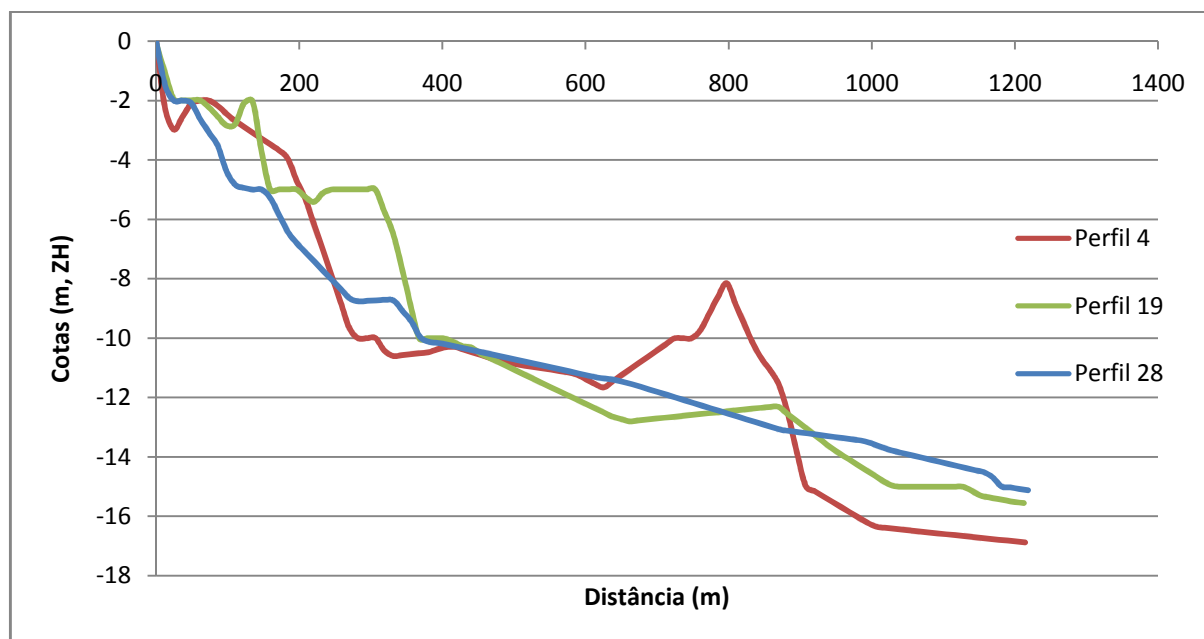


Fig. 4.8 – Exemplos de perfis de praia

Para a determinação da inclinação média dos taludes cada um dos perfis foi separado em três troços. O primeiro com inclinação  $i_1$  desde a linha de costa até uma distância de aproximadamente 300m, o segundo, de inclinação  $i_2$ , desde os 300m até cerca de 600m e o último com uma inclinação  $i_3$ , até ao final do perfil. Apesar da grande irregularidade e das diferenças entre os vários perfis, optou-se por escolher estes três troços por várias razões. Em primeiro lugar a estrutura deverá localizar-se entre os 300 e os 500 metros da costa, depois porque se verifica uma semelhança em todos os perfis, ilustrando que nos primeiros metros há uma inclinação acentuada, quase nula até aos 600m e intermédia até ao final do perfil. Além disso é possível associar a cada troço um intervalo de inclinações, sendo o primeiro para pequenas profundidades (0 a -6), o segundo para profundidades médias (-6 a -11) e o terceiro para maiores profundidades (-11 a -17). No quadro 4.5 encontram-se as várias inclinações para cada troço, em cada perfil.

Quadro 4.5 – Inclinação média do talude de praia

| Perfil | $i_1$ | $i_2$  | $i_3$ | Perfil | $i_1$ | $i_2$ | $i_3$ |
|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 4      | 1/16  | 1/199  | 1/113 | 18     | 1/72  | 1/58  | 1/170 |
| 5      | 1/16  | 1/2240 | 1/91  | 19     | 1/62  | 2/83  | 1/188 |
| 6      | 1/33  | 1/656  | 1/92  | 20     | 1/61  | 1/60  | 1/187 |
| 7      | 1/47  | 1/115  | 1/92  | 21     | 1/39  | 1/78  | 1/204 |
| 8      | 1/121 | 1/62   | 1/97  | 22     | 1/34  | 1/141 | 1/208 |
| 9      | 1/131 | 1/61   | 1/96  | 23     | 1/34  | 1/149 | 1/200 |
| 10     | 1/113 | 1/72   | 1/85  | 24     | 1/35  | 1/99  | 1/189 |
| 11     | 1/59  | 1/87   | 1/95  | 25     | 1/45  | 1/80  | 1/176 |
| 12     | 1/47  | 1/225  | 1/84  | 26     | 1/44  | 1/67  | 1/165 |
| 13     | 1/40  | -1/100 | 1/51  | 27     | 1/55  | 1/75  | 1/159 |
| 14     | 1/35  | 1/114  | 1/98  | 28     | 1/35  | 1/119 | 1/159 |
| 15     | 1/42  | 1/85   | 1/104 | 29     | 1/32  | 1/176 | 1/163 |
| 16     | 1/47  | 1/83   | 1/114 | 30     | 1/16  | 1/128 | 1/169 |
| 17     | 1/46  | 1/97   | 1/137 | 31     | 1/16  | 1/118 | 1/185 |

#### 4.3.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Nesta região da foz predominam as rochas metamórficas uma vez que aqui passa a faixa de cisalhamento Porto-Tomar. Este conjunto de rochas é denominado Complexo Metamórfico da Foz do Douro (CMFD) formado por duas unidades. Uma constituída pelos já referidos gnaisses e outra por metassedimentos. Encontram-se também porções de granitos, figura 4.9, Silva e Flores (2002).

As areias existentes são de também de origem metamórfica, sendo possível encontrar minerais comuns aos basaltos e granitos. Na região não é notório o movimento de areias, sendo os sedimentos transportados pelo rio Douro depositados a sul. Os sedimentos que aí poderiam ser depositados seriam transportados pelas correntes longitudinais vindas do norte ou do resultado do transporte sólido do rio Leça. Os primeiros têm como obstáculo o quebramar norte do porto de Leixões, por isso acumulam-se predominantemente na praia de Leça ou são transportados ao longo do quebramar e aí levados para maiores profundidades. Além disso, uma parte deles passa através do próprio quebramar, devido à

porosidade, depositando-se na bacia do porto de Leixões juntamente com os sedimentos do rio Leça, Dando origem a operações de dragagens ou quando transportados para fora do porto, por ser já tão distante da costa são transportados para maiores profundidades ou para sul. Em alguns casos os sedimentos dragados foram colocados nas imediações do Castelo do Queijo, tendo sido arrastados ao fim de algum tempo.

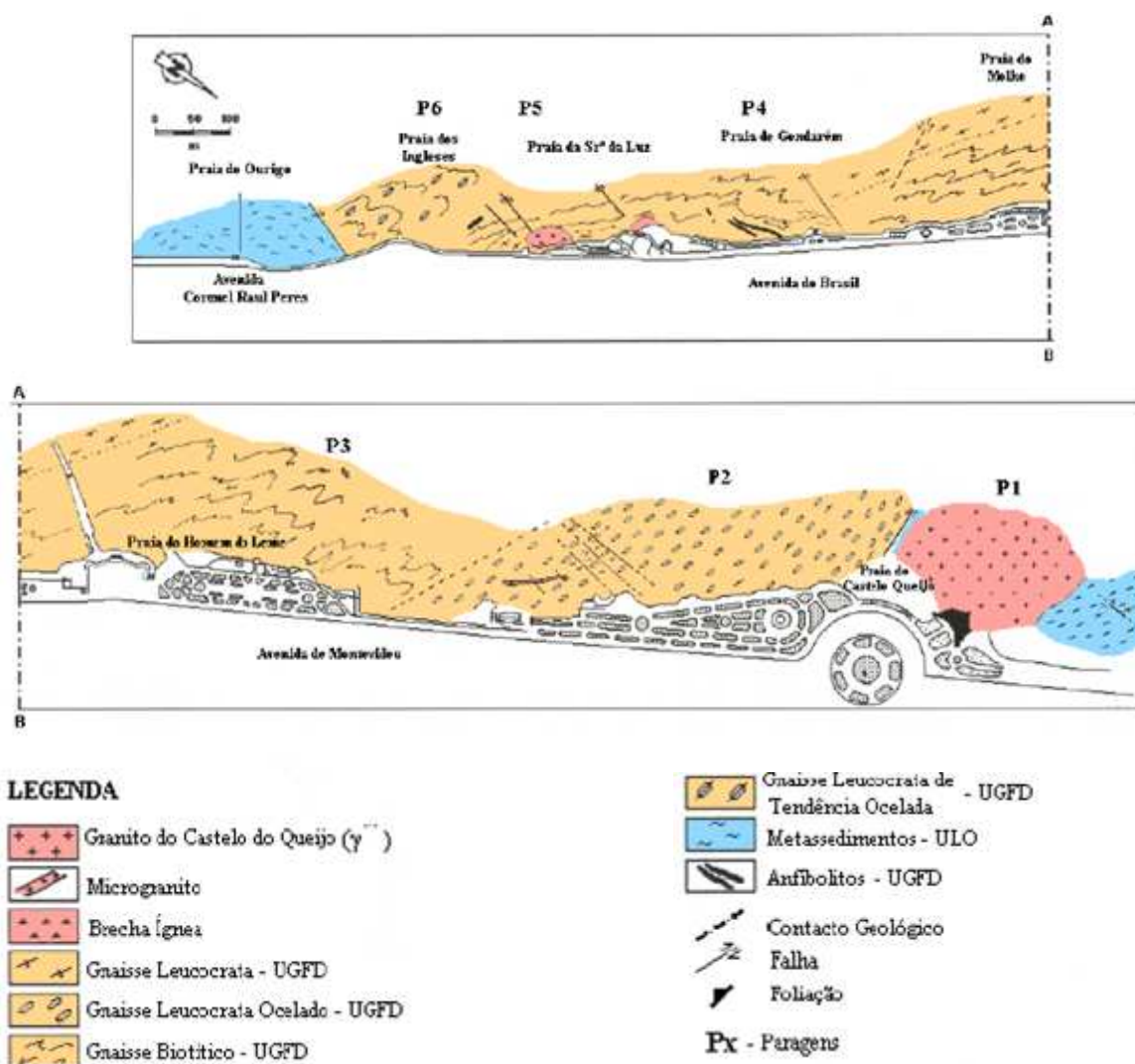


Fig. 4.9 – Mapa geológico do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Silva e Flores, 2002).

#### 4.4. SOLUÇÕES E MEDIDAS

A protecção da zona marginal da frente marítima do Porto poderá passar pela construção de uma obra de defesa artificial. Se os afloramentos rochosos não garantem a segurança pretendida a construção de um quebramar destacado pode ser apresentada como uma solução possível, já que provocará uma diminuição da energia com que a agitação atinge a costa.

Como já foi referido, a existência do Porto de Leixões influencia de certo modo a agitação local, assim como, o Molhe de Carreiros, protegendo ou limitando parte da área de intervenção. Este, pela sua pequena dimensão tem também uma influência muito localizada, e um pouco a sul encontra-se uma

das zonas mais afectadas, a praia de Gondarém, figura 4.10, onde o mar atingiu a calçada pedonal, como já foi referido anteriormente.

Ainda um pouco mais a sul, na praia dos Ingleses encontra-se uma zona visivelmente mais marcada pela acção do mar, na qual estão a decorrer obras de reforço da sua protecção, já que, apesar de em baixa-mar ser visível uma grande massa rochosa, em preia-mar a praia é quase inexistente, figuras 4.11 a 4.14. No anexo A3 encontram-se mais algumas fotografias do local recolhidas no inverno e na primavera de 2009.



Fig 4.10 – Praia de Gondarém, 6 de Março de 2009,



Fig 4.11 – Praia dos Ingleses, 6 de Março de 2009.

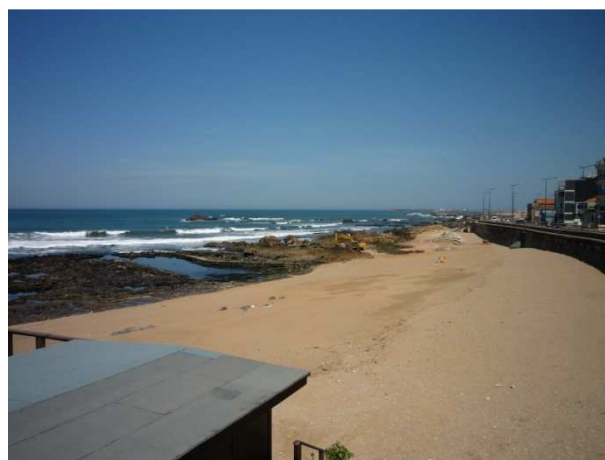


Fig 4.12 – Praia dos Ingleses, 27 de Maio de 2009.

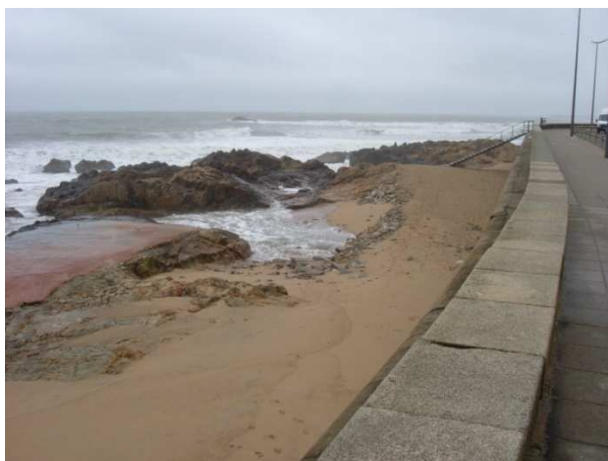


Fig. 4.13 – Pormenor da praia dos Ingleses, 6 de Março de 2009.



Fig. 4.14 – Pormenor da praia dos Ingleses, 27 de Maio de 2009.

Neste projecto é apresentada como hipótese de protecção dessas zonas a construção de um sistema de quebra-mares destacados, constituído por dois segmentos, com orientação paralela à costa.

Os restantes parâmetros foram determinados pelos métodos já descritos no capítulo 3 tendo sido dada especial atenção aos impactes paisagísticos, pois a paisagem é um dos pontos fortes da região e é desejável mantê-la. Para isso procurou-se uma solução em enrocamento, com cota de coroamento relativamente baixa, garantindo a sua eficácia, mas agradável à vista. Foram também estudadas hipóteses com cotas de coroamento a variar entre 3,50m e 4,5m (ZH), quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Definição de alguns parâmetros estruturais para as várias hipóteses estudadas.

|   | Material                    | Direcção | Forma      | Cota de Coroamento (ZH) (m) |
|---|-----------------------------|----------|------------|-----------------------------|
| 1 | Enrocamento                 | NW-SE    | Rectilíneo | 3,5                         |
| 2 | Enrocamento e geossintético | NW-SE    | Rectilíneo | 3,5                         |
| 3 | Enrocamento                 | NW-SE    | Rectilíneo | 4,0                         |
| 4 | Enrocamento e geossintético | NW-SE    | Rectilíneo | 4,0                         |
| 5 | Enrocamento                 | NW-SE    | Rectilíneo | 4,5                         |
| 6 | Enrocamento e geossintético | NW-SE    | Rectilíneo | 4,5                         |

No que diz respeito ao perfil a solução idealizada foi baseada num perfil típico de quebramar de taludes, constituído por várias camadas de enrocamento e núcleo. Procurando conjugar aspectos paisagísticos com a eficácia da estrutura propõe-se também uma irregularidade da cota de coroamento variando, ao longo do desenvolvimento da estrutura. Associados a essa irregularidade estão também aspectos de segurança, já que se se assemelhar a uma plataforma, em maré-baixa alguns banhistas podem tentar alcançar a estrutura. Por isso, variando a cota de coroamento, a estrutura será mais parecida com afloramentos rochosos naturais e aceder à mesma não será tão aliciante.

# 5

## MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA DO PROJECTO

### 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesta memória descritiva e justificativa são apresentadas as várias opções tomadas para a definição do sistema de quebramares em estudo. É explicado como e porque foi escolhida a solução seleccionada que é mais pormenorizadamente apresentada.

Por existirem dados comuns a todas as soluções, inicialmente são expostos os parâmetros gerais como a altura de onda, o período, coeficientes adoptados, e outros. Na verdade, os dimensionamentos estrutural e hidráulico não foram efectuados em separado, mas para uma melhor organização são apresentados separadamente.

### 5.2. ELEMENTOS DE BASE DE CÁLCULO

#### 5.2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os blocos utilizados neste projecto são de enrocamento granítico de peso volúmico  $26,50\text{kN/m}^3$ . Foi considerado que o peso volúmico da água do mar é de  $10,25\text{kN/m}^3$ , logo a densidade relativa dos blocos  $\Delta$  tem o valor de 0,613.

Os valores relativos aos coeficientes de estabilidade foram escolhidos com base no que é habitual nestes projectos. Por exemplo, o valor de  $K_D$  foi seleccionado tendo em conta uma percentagem de quedas de 2,0% a 2,5%. Tendo em atenção os quadros 3.4 e 3.5, foram escolhidos alguns valores de  $K_D$  de modo a efectuar o dimensionamento para diferentes casos. Os valores seleccionados segundo os critérios do LNEC encontram-se no quadro 5.1. Quando seguindo as indicações do SPM, para uma estrutura localizada na zona de rebentação, com blocos pouco rugosos no manto resistente de duas camadas utilizou-se na secção corrente um  $K_D$  de 2,1 e na cabeça 1,7.

Quadro 5.1 – Coeficientes  $K_D$  da fórmula de Hudson para enrocamento utilizados, segundo indicações do LNEC.

| Percentagem de queda | Probabilidade de não-excedência |      |
|----------------------|---------------------------------|------|
|                      | 0,01                            | 0,05 |
| 2,0                  | 5,7                             | 7,7  |
| 2,5                  | 6,4                             | -    |

Relativamente ao coeficiente de forma da equação 3.37, tendo em atenção que os blocos são de enrocamento e com forma irregular, é aconselhável pelo SPM o valor de 1,15.

### 5.2.2. CARACTERÍSTICAS DA AGITAÇÃO

A agitação é neste projecto a acção principal sobre a estrutura, porém não pode ser esquecido que o comportamento desta depende da profundidade local, logo variável com a altura de maré. Foi considerado que a maré na região norte do país é variável entre 0,0m (ZH) e +4,0m (ZH). A proximidade ao Porto de Leixões permite considerar dados do mesmo, relativos à agitação como foi efectuado no capítulo 4, quadro 4.2.

Relativamente à altura de onda, com base nos dados expostos no capítulo anterior e com base em cálculos efectuados a partir de relações com a profundidade local foi seleccionada a altura de onda de projecto, quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Altura de onda máxima compatível com a profundidade, altura de onda significativa e altura de onda média do décimo superior, para a profundidade de -5,0m (ZH).

|         | $H_{m\acute{a}x}$ | $H_s$ | $H_{1/10}$ |
|---------|-------------------|-------|------------|
| Leixões | 8,52              | 4,40  | 5,59       |
| Local   | 7,02              | 3,99  | 5,07       |

Pelo quadro 5.2 é perceptível que os valores calculados são relativamente semelhantes mas inferiores aos registados em Leixões. Apesar da proximidade ao Porto de Leixões, que levaria a adoptar valores relativos a este, como as profundidades existentes são superiores às profundidades locais deste projecto, optou-se por usar como altura de onda de projecto a altura de onda média do décimo superior, igual a 5,07m.

### 5.3. DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA

O sistema de quebramares destacados estará localizado entre os molhes de Carreiros e Felgueiras. Por observação local verificou-se que as regiões mais afectadas são a praia de Gondarém e a praia dos Ingleses. Sendo o objectivo proteger essas regiões o sistema será constituído por dois quebramares destacados paralelos à linha de costa, ou seja com orientação noroeste-sudeste. Se se pretender melhorar as condições para a acumulação de sedimentos a sotamar das estruturas pode ser estudada uma orientação que proporcione tais condições, de acordo com a agitação.

Devido à grande irregularidade dos fundos e às grandes diferenças entre cada perfil foi efectuada a média das inclinações dos vários perfis nas regiões onde seriam implantados os quebramares, mais concretamente entre os perfis 6 e 14 e os perfis 19 e 27, anexo A2. Próximo da linha de costa a inclinação média é de 1/53 e 1/43 no local de implantação, e entre 300 e 600 metros a inclinação média diminui para 1/126 e 1/76. Porém, para possibilitar a aplicação do método JMC foi necessário adoptar a inclinação de 1/50 muito superior àquela que se verifica a distâncias de 300 a 600 metros da costa, mas próxima da verificada mais próximo da costa.

Após a avaliação dos resultados dos métodos empíricos, incluindo do JMC, optou-se por definir o local de implantação à profundidade média de 9,0m, ou seja fundos de -5,0m (ZH), a uma distância de 400m da costa para a estrutura mais a norte e a uma distância de 300m para a estrutura mais a sul. Esta

opção foi resultado de uma ponderação, comparando o proposto pelo JMC com a topografia existente, o que será detalhado mais à frente neste capítulo.

Os quebramares serão rectilíneos com um coroamento de 400m de desenvolvimento e 10,4m de largura, com inclinações dos taludes anterior e posterior 2:1 e 3:2 respectivamente. A inclinação dos taludes nas cabeças será igual à do talude anterior.

A cota de coroamento de projecto considerada foi de +4,0m (ZH). Esta solução foi influenciada pelo nível de protecção pretendido e pelo seu enquadramento na paisagem. Sugere-se que na fase de construção seja criada uma linha de coroamento irregular, sendo aceitável uma variação de  $\pm 0,5$ m. No anexo A4 está representado um perfil longitudinal da estrutura com essa variação de cotas. Deste modo a integração na paisagem será mais eficaz e poderá haver dissipação de energia causada por tal irregularidade. Foi por factores semelhantes que se optou pela largura de coroamento de 10,5m. O mínimo usual ronda os 7m devido a imposições construtivas, para possibilitar a circulação de equipamentos, ou em função do diâmetro médio dos blocos, colocar apenas três blocos no coroamento. No projecto em causa, foi adoptado  $6D_{n50}$  já que é o valor sugerido por Vidal *et al.*, aumentando ao mesmo tempo a eficácia hidráulica, ao diminuir o coeficiente de transmissão. Efectuou-se assim uma ponderação entre a eficácia e o volume da estrutura.

A cota de coroamento escolhida foi influenciada principalmente pelas alterações na paisagem. Não é certa a formação de tómbolos, mas neste projecto o objectivo é mais a diminuição da energia da agitação. Por isso, desde logo se excluíram cotas superiores a +4,5m (ZH), e após avaliação desse valor optou-se por valores menores já que entre +4,0m (ZH) e +4,5m (ZH) a diferença não era significativa.

Pretende-se que os quebramares possuam um perfil transversal típico no que diz respeito ao núcleo e subcamadas, e um manto resistente com duas camadas de blocos. Contudo, para alcançar a referida irregularidade os blocos do manto resistente devem ser colocado de modo a, dentro do possível, dar aspecto de uma formação rochosa natural.

No que diz respeito à fundação, é desejável que seja executada, de forma a prevenir erosões na base dos taludes e de modo a prevenir a ruína da estrutura, é aconselhável a colocação à cota de -5,0m (ZH) de geotêxtil.

## 5.4. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

### 5.4.1. INTRODUÇÃO

A definição do peso unitário dos blocos do manto resistente foi efectuada com base nos métodos descritos no capítulo 3 descrevendo-se de seguida as opções tomadas e os resultados encontrados.

Para uma correcta aplicação do método de Vidal *et al.* foi adoptada a inclinação de taludes indicada para as duas estruturas. Nos restantes métodos foi usada a inclinação de 2:1, já que este será aquele que estará mais exposto à agitação. Para o talude posterior foram adoptados blocos de igual dimensão introduzindo assim maior segurança no talude anterior.

Sempre que aplicável, foi utilizado o factor de redução de van der Meer ao peso dos blocos, já que se trata, neste caso, de um quebramar de baixa cota de coroamento. Apesar de a cota de coroamento seleccionada ser de +4,0m (ZH), uma vez que poderá ser possível uma variação da mesma, apresentam-se também valores para cotas de +3,5m (ZH), tendo a selecção sido efectuada através de uma ponderação entre os dois casos.

## 5.4.2. PESOS UNITÁRIOS DOS BLOCOS DO MANTO RESISTENTE – PERFIL CORRENTE

## 5.4.2.1. Dimensionamento pela fórmula de Hudson

Seguindo o exposto em 3.2.1, foi calculado o peso dos blocos com base na expressão 3.25. Foram utilizados os coeficientes de estabilidade já indicados no início deste capítulo, tal como a altura de onda de projecto seleccionada. No quadro 5.3 encontram-se os primeiros valores do peso e do diâmetro médio dos blocos, para os vários coeficientes de estabilidade adoptados, antes da aplicação do factor de redução.

 Quadro 5.3 – Peso unitário,  $W_{Hudson}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$ .

| $K_D$      | $H_{proj}$ [m] | Material            | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_w$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\cotg \theta$ | $W_{Hudson}$ [kN] | $D_{n50}$ [m] |
|------------|----------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------|-------------------|---------------|
| 2,1 (SPM)  | 5,07           | Rochoso e irregular | 26,5                          | 10,25                           | 2              | 206               | 2,28          |
| 5,7 (LNEC) |                |                     |                               |                                 |                | 76                | 1,63          |
| 7,7 (LNEC) |                |                     |                               |                                 |                | 57                | 1,48          |
| 6,4 (LNEC) |                |                     |                               |                                 |                | 68                | 1,57          |

É interessante verificar a grande variedade de resultados que se obtém com um só método. Mais uma vez se percebe a importância da definição do parâmetro  $K_D$ , pois foi o único que foi alterado, logo foi o que originou tais diferenças. Note-se ainda que o valor que se destaca mais é o resultante da aplicação do valor de  $K_D$  do SPM. Não será de desprezar tal diferença, já que o facto de o coeficiente de estabilidade ser menor garante maior segurança, porém para uma primeira avaliação parece ser um valor exagerado para blocos de enrocamento granítico.

## 5.4.2.2 Dimensionamento pela fórmula de van der Meer

Para a aplicação da fórmula de van der Meer foram determinados em primeiro lugar alguns parâmetros de modo a definir o tipo de rebentação presente, equações 3.26 e 3.27. De acordo com a figura 3.14 o valor factor de permeabilidade  $P$  tem o valor de 0,4; o valor de  $\tan \theta$  é de 0,5 já que o talude tem inclinação de 2:1, e finalmente, a altura de onda de 5,07m, permite definir a declividade com o valor de 0,026. Tem-se assim uma rebentação do tipo mergulhante, já que o número de Iribarren (3,11) é inferior ao crítico (3,77). Logo, o diâmetro médio dos blocos será determinado pela expressão 3.28.

Para o cálculo do diâmetro médio dos blocos é necessário ainda determinar o número de ondas e nível de estragos. Para o primeiro existe um limite de 7500 ondas, mas tendo em conta que em Leixões a estofa da preia-mar de águas vivas é de 3h, adoptou-se esse valor como duração da tempestade (Pereira, 2008), já que seria o pior cenário associar à tempestade o nível mais elevado de maré. Então, com um período de 11,2 segundos conclui-se que o número de ondas será de 965. Relativamente ao nível de estragos, quadro 3.6, foi adoptado o valor de 2. Então, aplicando a equação 3.28 tem-se o resultado exposto no quadro 5.4.

 Quadro 5.4 – Peso unitário,  $W_{van\ der\ Meer}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$ .

| $H_{proj}$ (m) | $P$ | $N_z$ | $\Delta$ | $S$ | $\xi_m$ | $\cot \theta$ | $D_{n50}$ | $W_{van\ der\ Meer}$ (kN) |
|----------------|-----|-------|----------|-----|---------|---------------|-----------|---------------------------|
| 5,07           | 0,4 | 965   | 1,59     | 2   | 3,11    | 2             | 1,85      | 111                       |

Tendo em conta as baixas cotas de coroamento da estrutura, +3,5m (ZH) e +4,0m (ZH), foi também aplicada a equação 3.32 para quebramares galgáveis. Os resultados encontrados apresentam-se nos quadros 5.5 e 5.6, juntamente com os valores adoptados para as variáveis dessa expressão. O valor do nível de estragos foi o mesmo que o utilizado para o caso de quebramar não-galgável.

Quadro 5.5 – Peso unitário,  $W_{\text{van der Meer}}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$ , para a cota de +3,5m (ZH).

| $H_{\text{proj}}$ (m) | $\Delta$ | S | $s_{\text{op}}$ | d (m) | h (m) | $D_{n50}$ | $W_{\text{van der Meer}}$ (kN) |
|-----------------------|----------|---|-----------------|-------|-------|-----------|--------------------------------|
| 5,07                  | 1,59     | 2 | 0,026           | 9     | 8,5   | 1,7       | 85                             |

Quadro 5.6 – Peso unitário,  $W_{\text{van der Meer}}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$ , para a cota de +4,0m (ZH).

| $H_{\text{proj}}$ (m) | $\Delta$ | S | $s_{\text{op}}$ | d (m) | h (m) | $D_{n50}$ | $W_{\text{van der Meer}}$ (kN) |
|-----------------------|----------|---|-----------------|-------|-------|-----------|--------------------------------|
| 5,07                  | 1,59     | 2 | 0,026           | 9     | 9,0   | 1,81      | 104                            |

#### 5.4.2.3. Dimensionamento pela fórmula de Powell e Allsop

De acordo com o apresentado no ponto 3.2.3 só é possível aplicar este método quando o grau de submergência iguala os valores do mesmo, Sendo as cotas de coroamento estudadas de +3,5m (ZH), +4,0m (ZH) e +4,5m (ZH), para uma cota de fundação de -5,0m (ZH) obtêm-se valores de  $R_c/d$  de 0,0 e  $\pm 0,06$ , porém os valores para o regime de ondas curtas são de 0,23, 0,38 e 0,57. Tal facto é compreensível já que o método foi desenvolvido para quebramares não galgáveis, podendo depois ser aplicado o factor de redução.

Apesar de não ser aplicável devido às baixas cotas de coroamento, efectuou-se uma aproximação do peso dos blocos do manto resistente adoptando os valores impostos pelo método, para no final comparar com os restantes métodos. Assim, foi admitido o nível de estragos de 2,5% e 5%, tal como na fórmula de Hudson. Então pelas curvas expressas pela equação 3.37, foi calculado o parâmetro adimensional de altura de onda  $N_s$ , quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Parâmetros intervenientes na equação 3.29

| $H_{\text{proj}}$ (m) | T (s) | $L_{\text{op}}$ (m) | $s_{\text{op}}$ | Tipo de Onda | A     | B    | $N_s^{2,5\%}$ | $N_s^{5,0\%}$ |
|-----------------------|-------|---------------------|-----------------|--------------|-------|------|---------------|---------------|
| 5,07                  | 11,19 | 195,51              | 0,026           | Onda Curta   | 0,008 | 2,31 | 2,487         | 2,787         |

Sendo  $N_s$  o parâmetro de altura de onda adimensional é possível calcular o valor do peso dos blocos e o respectivo diâmetro médio. No quadro 5.8 apresentam-se os valores resultantes desse cálculo.

Quadro 5.8 – Peso unitário,  $W_{\text{Powell e Allsop}}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$

| $N_e/N_a$ (%) | $N_s$ | $H_{\text{proj}}$ (m) | $\Delta$ | $D_{n50}$ (m) | $W_{\text{Powell\&Allsop}}$ (kN) |
|---------------|-------|-----------------------|----------|---------------|----------------------------------|
| 2,5           | 2,487 | 5,07                  | 1,59     | 1,28          | 37                               |
| 5             | 2,787 | 5,07                  | 1,59     | 1,15          | 27                               |

Adoptando o mesmo método mas agora para o parâmetro de estabilidade espectral,  $N_s^*$ , logo, utilizando os parâmetros A e B do quadro 3.7, para os mesmos níveis de estragos, quadro 5.9, foi calculado o diâmetro dos blocos pela equação 3.38, quadros 5.9 e 5.10.

Quadro 5.9 – Parâmetros intervenientes na equação 3.34

| $H_{proj}$ (m) | T (seg) | $L_{op}$ (m) | $S_{op}$ | Tipo de Onda | A      | B    | $N_s^{*2,5\%}$ | $N_s^{*5,0\%}$ |
|----------------|---------|--------------|----------|--------------|--------|------|----------------|----------------|
| 5,07           | 11,19   | 195,51       | 0,026    | Onda Curta   | 0,0059 | 1,07 | 5,653          | 6,301          |

Quadro 5.10 – Peso unitário,  $W_{Powell}$  e  $W_{Allsop}$ , e diâmetro médio  $D_{n50}$

| $N_e/N_a$ (%) | $N_s^*$ | $H_{proj}$ (m) | $\Delta$ | $D_{n50}$ (m) | $W_{Powell\&Allsop}$ (kN) |
|---------------|---------|----------------|----------|---------------|---------------------------|
| 2,5           | 5,653   | 5,07           | 1,59     | 1,91          | 121                       |
| 5             | 6,301   | 5,07           | 1,59     | 1,71          | 87                        |

Dos vários resultados percebe-se que o facto de se considerar a agitação irregular introduz um aumento no resultado final, sendo esses valores da ordem de grandeza dos encontrados pela fórmula de van der Meer, que também utiliza parâmetros de agitação irregular.

#### 5.4.2.4. Dimensionamento pela fórmula de Vidal *et al.*

Segundo o exposto no ponto 3.2.3, para a fórmula de Vidal *et al.* é necessário calcular para um método seleccionado o valor do diâmetro médio dos blocos para quebra-mares não galgáveis e outros parâmetros relativos à geometria da estrutura. Então, para as cotas de coroamento de +3,5m (ZH) e +4,0m (ZH) tem-se uma altura livre acima do nível de preia-mar de -0,5m e 0m, respectivamente.

Antes de se iniciar o processo de cálculo, calculou-se, pela fórmula de van der Meer para quebra-mares não galgáveis o diâmetro dos blocos para as inclinações de talude de 2:1 para a cabeça e o perfil corrente e 3:2 somente para o perfil corrente. Para determinar o valor do peso dos blocos na cabeça da estrutura foi majorado o peso dos blocos do talude com a mesma inclinação por um factor 1,5. De acordo com a notação do método, foram adoptados os valores do quadro 5.11.

Quadro 5.11- Pesos unitários e respectivos diâmetros para quebra-mares não galgáveis para a aplicação do método Vidal *et al.*

| Inclinação do talude | Cabeça    |                    | Perfil    |                     |
|----------------------|-----------|--------------------|-----------|---------------------|
|                      | Peso (kN) | Diâmetro (m)       | Peso (kN) | Diâmetro (m)        |
| 2:1                  | 166       | $D_{H\infty}=2,14$ | 111       | $D_{\infty 1}=1,85$ |
| 3:2                  | -         | -                  | 171       | $D_{\infty 2}=2,15$ |

Conhecidos esses parâmetros, seguiu-se para a definição dos níveis de estragos para cada secção, para a aplicação das expressões 3.40 a 3.42. O nível de estragos máximo  $N_{sFS\infty}$  é igual a 2,41. Para as várias secções definidas por este método foi calculado o diâmetro médio dos blocos, e o respectivo peso unitário, quadros 5.12 e 5.13. Nesses estão expressos apenas os valores de  $F_d$  e não de  $N_s(F_d)$  já que estes, além de dependerem de  $F_d$ , dependem também da secção. No anexo A5 apresentam-se detalhadamente os parâmetros de estabilidade relativos a este método. Para o talude anterior (FS) é

necessário calcular o diâmetro considerando duas inclinações, uma com valor de 2:1 (1) e outra com o valor de 3:2 (2), já que o valor de  $D_C$  é calculado através do valor de  $D_{FS2}$ .

Os valores presentes nestes quadros são já os valores finais, pois este método aplica-se a estruturas galgáveis. No quadro não está indicado o valor referente à cabeça anterior, FH, porque se adoptaram blocos de igual diâmetro aos da cabeça posterior. É interessante, mas compreensível, verificar que para a cota mais elevada os blocos do coroamento serão mais pequenos. Ainda por muito pequena que seja essa diferença (3kN), percebe-se que se deve ao facto de quanto menor for a cota mais galgamentos se verificam.

Quadro 5.12 – Diâmetro médio dos blocos para cada secção, para uma cota de coroamento de +3,5m (ZH)

| Secção |   | $F_d$ | Diâmetro (m) | $W_{Vidal et al}$ (kN) |
|--------|---|-------|--------------|------------------------|
| FS     | 1 | -0,27 | 1,29         | 56                     |
|        | 2 | -0,23 | 1,50         | -                      |
| BS     |   | -0,33 | 1,17         | 42                     |
| C      |   | -0,33 | 1,72         | 133                    |
| BH     |   | -0,23 | 1,36         | 66                     |

Quadro 5.13 – Diâmetro médio dos blocos para cada secção, para uma cota de coroamento de +4,0m (ZH)

| Secção |   | $F_d$ | Diâmetro (m) | $W_{Vidal et al}$ (kN) |
|--------|---|-------|--------------|------------------------|
| FS     | 1 | 0     | 1,34         | 62                     |
|        | 2 | 0     | 1,54         | -                      |
| BS     |   | 0     | 1,25         | 51                     |
| C      |   | 0     | 1,71         | 130                    |
| BH     |   | 0     | 1,45         | 81                     |

#### 5.4.3. PESOS UNITÁRIOS DOS BLOCOS DO MANTO RESISTENTE – PERFIL DA CABEÇA

Estando a região da cabeça mais exposta à acção da agitação que o restante da estrutura entendeu-se que deveria ser calculado separadamente o peso dos blocos nesta secção, majorando o valor do peso unitário calculado anteriormente. Como anteriormente foi referido, não se diferenciaram as regiões anterior e posterior da cabeça tendo-se adoptado os valores obtidos para o cálculo da cabeça posterior, isto porque, esta, além da rebentação, refracção, difracção, está também sujeita aos impactes devido aos galgamentos e aos efeitos de sucção.

Escolheu-se majorar o peso dos blocos em 50%, através de um factor de 1,5. Esta majoração foi aplicada apenas aos resultados das fórmulas que não efectuam a diferenciação entre as secções, ou seja, Hudson, van der Meer, quadro 5.14. Para a fórmula de Powell e Allsop, não sendo aplicável neste projecto como já se demonstrou, não foi efectuado este cálculo, tendo sido aplicada esta fórmula para mera comparação de métodos.

Na fórmula de Hudson, quando utilizados os coeficientes  $K_D$  do SPM, a secção da cabeça estava já diferenciada e por isso o cálculo foi realizado como para a secção corrente, porém, com o valor de  $K_D$

igual a 1,7. Para este caso obteve-se para o peso unitário dos blocos o valor de 255kN, logo 2,45m de diâmetro médio dos blocos.

Quadro 5.14 – Pesos unitários de Hudson e van der Meer para as secções corrente e da cabeça, e respectivos diâmetros médios.

| Critério     |                       | Secção corrente |                      | Secção da cabeça |                      |
|--------------|-----------------------|-----------------|----------------------|------------------|----------------------|
|              |                       | W (kN)          | D <sub>n50</sub> (m) | W (kN)           | D <sub>n50</sub> (m) |
| Hudson       | (K <sub>D</sub> =5,7) | 76              | 1,63                 | 114              | 1,87                 |
|              | (K <sub>D</sub> =7,7) | 57              | 1,48                 | 86               | 1,70                 |
|              | (K <sub>D</sub> =6,4) | 68              | 1,57                 | 102              | 1,80                 |
| van der Meer |                       | 111             | 1,85                 | 166              | 2,14                 |

#### 5.4.4. FACTOR DE REDUÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DOS BLOCOS, R<sub>p</sub>

Para aqueles métodos cujo cálculo é efectuado para quebra-mares não galgáveis foi ainda aplicado o factor de redução de van der Meer. Este factor introduz uma diminuição das acções, já que a estrutura não está tão exposta à rebentação pelo facto de se verificarem galgamentos.

Como a metodologia apresentada por Vidal *et al.* é aplicável a estruturas galgáveis, somente aos restantes métodos foi aplicado o factor R<sub>p</sub>. Este coeficiente está limitado entre 0,8 e 1 e o mínimo é atingido quando R<sub>c</sub> é nulo, ou seja R<sub>p</sub><sup>\*</sup> é nulo também. Porém para a cota de coroamento de +3,5m (ZH), em que R<sub>c</sub> é tem valor negativo, o parâmetro R<sub>p</sub><sup>\*</sup> iguala -0,0063 que é muito próximo de zero, e por isso foi considerado aceitável o valor resultante da aplicação da redução em 20%, quadro 5.15. Os valores apresentados dizem respeito às secções corrente e da cabeça, para as cotas de +3,5m (ZH) +4,0m (ZH) já que o coeficiente de redução foi igual para os dois casos.

Quadro 5.15 – Pesos unitários de Hudson e van der Meer para as secções corrente e da cabeça, e respectivos diâmetros médios, após aplicação do factor de redução R<sub>p</sub>.

| Critério     |                       | Secção corrente |                      | Secção da cabeça |                      |
|--------------|-----------------------|-----------------|----------------------|------------------|----------------------|
|              |                       | W (kN)          | D <sub>n50</sub> (m) | W (kN)           | D <sub>n50</sub> (m) |
| Hudson       | (K <sub>D</sub> =5,7) | 39              | 1,31                 | 58               | 1,50                 |
|              | (K <sub>D</sub> =7,7) | 29              | 1,19                 | 44               | 1,35                 |
|              | (K <sub>D</sub> =6,4) | 35              | 1,35                 | 52               | 1,44                 |
|              | (K <sub>D</sub> =2,1) | 105             | 1,82                 | -                | -                    |
|              | (K <sub>D</sub> =1,7) |                 |                      | 130              | 1,95                 |
| van der Meer |                       | 57              | 1,48                 | 87               | 1,71                 |

#### 5.4.5. PESOS UNITÁRIOS DOS ELEMENTOS

Tendo sido calculados, pelos vários métodos, os pesos dos blocos para as duas secções, corrente e da cabeça, foi necessário escolher aquele que seria utilizado na construção. Para isso foi efectuada uma análise com base nos vários valores encontrados. No quadro 5.16 apresenta-se um resumo dos valores resultantes dos cálculos realizados.

Quadro 5.16- Pesos unitários dos blocos do manto resistente.

| Critérios de Dimensionamento | Condições específicas | Perfil corrente                       | Perfil da cabeça                      |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Hudson                       | $K_D=5,7$             | 39                                    | 58                                    |
|                              | $K_D=7,7$             | 29                                    | 44                                    |
|                              | $K_D=6,7$             | 35                                    | 52                                    |
|                              | $K_D=2,1$             | 105                                   |                                       |
|                              | $K_D=1,7$             |                                       | 130                                   |
| Powell e Allsop              | $N_s=2,5\%$           | 37                                    | -                                     |
|                              | $N_s=5\%$             | 27                                    | -                                     |
|                              | $N_s^*=2,5\%$         | 121                                   | -                                     |
|                              | $Ns^*=5\%$            | 87                                    | -                                     |
| Vidal <i>et al.</i>          |                       | 56 <sup>(1)</sup> , 62 <sup>(2)</sup> | 66 <sup>(1)</sup> , 81 <sup>(2)</sup> |
| van der Meer                 |                       | 57                                    | 87                                    |

<sup>(1)</sup> Valor resultante quando é considerada a cota de coroamento de +3,5m (ZH);

<sup>(2)</sup> Valor resultante quando é considerada a cota de coroamento de +4,0m (ZH)

É importante referir que os valores apresentados para a fórmula de van der Meer são relativos à fórmula para quebramares não galgáveis após aplicação do coeficiente de redução. Porém, considerando o quebramar submerso é possível encontrar os valores apresentados quadros 5.5 e 5.6, relativos ao perfil corrente, sem aplicação do coeficiente de redução por já estar implícito que a estrutura é galgável. Acrescentam-se os valores de 85kN e 104kN, para cotas de +3.5m (ZH) e +4,0m (ZH) respectivamente.

Perante uma tão variada gama de valores e tendo em conta os resultados de van der Meer para quebramares submersos optou-se por blocos de 90kN, ou seja 9 ton, sendo admissível o intervalo de 70kN a 115kN.

Esta decisão foi também influenciada por alguns factores que se passam a descrever. Por um lado os resultados de van der Meer para quebramares submersos estão entre 85kN e 104kN. Na verdade, os valores do mesmo autor para quebramares não galgáveis quando aplicado o coeficiente de redução são cerca de 50% menores, porém para a cota de +3,5m (ZH) é mais correcto aplicar as expressões para quebramares submersos pois o factor de redução já não deveria ser aplicado pois  $R_c < 0$ . Por outro lado, no quebramar destacado construído na barra do Rio Douro foram utilizados cubos de 80kN. Este valor não foi utilizado para determinação do peso dos blocos deste projecto, mas apenas foi utilizados como

uma referência, já que para a construção se recorreu a blocos de betão e está implantado em fundos moveis na foz de um rio.

Perante os valores para o perfil da cabeça teve-se em atenção que para um baixo valor de  $K_D$  na fórmula de Hudson o peso resultante dessa é 130kN. Pela posição em planta, anexo A6, e pela direcção da agitação na região percebe-se que as cabeças de norte estarão sujeitas directamente à acção da agitação. Contudo, por limitações de transporte não é usual utilizar blocos de enrocamento com peso superior a 120kN, por esse motivo adoptou-se esse valor para os blocos da secção da cabeça.

Para as subcamadas, núcleo e risberma foram seguidas as indicações do CEM, expostas na figura 3.21. O núcleo será constituído por enrocamento de TOT e os blocos das subcamadas e risbermas serão dez vezes menores que os do manto resistente, ou seja, entre 7kN e 11,5kN. Para a risberma das cabeças e do talude anterior é conveniente considerar blocos de maior dimensão aumentando a segurança face às infraescavações. Sugere-se a aplicação de blocos com o dobro do peso calculado para a risberma posterior, isto é, blocos com pesos entre 14kN e 23kN.

## **5.5. CONCEPÇÃO HIDRÁULICA**

### **5.5.1. INTRODUÇÃO**

Neste projecto foi designado como objectivo a diminuição da agitação junto à costa. Naturalmente, deseja-se que também sejam melhoradas as condições balneares pela alteração da linha de costa, devido à acumulação de sedimentos.

Inicialmente foi utilizado o método JMC, exposto no capítulo 3, para determinar a distância à qual deve ser colocada a estrutura, assim como o seu comprimento e a distância entre segmentos. Sendo de grande importância conhecer as alterações da agitação, foi escolhida a cota de coroamento após avaliação de resultados relativos ao coeficiente de transmissão e dos métodos empíricos para a resposta da linha de costa.

Os valores apresentados nos pontos seguintes dizem respeito já as soluções seleccionadas, para a cota de coroamento, cota de fundação e dimensões da estrutura.

### **5.5.2. ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS**

#### **5.5.2.1. Método do JMC**

Como descrito em 3.1.2.2 este método permite calcular a dimensão e a localização da estrutura para determinada saliência. Porém, não havendo neste caso nenhuma largura de saliência especificamente desejada, o que se procurou fazer foi encontrar a distância a colocar a estrutura e consequentemente a profundidade a que ela estaria, comparando a cada iteração com os perfis transversais da praia.

A batimetria utilizada só possui valores até à cota 0,0m (ZH) e nos perfis apresentados é visível a distância a uma linha aproximadamente paralela à linha de costa e não à própria linha de costa. Uma vez que, a distância que surge como resultado do método, é a distância à cota +4.0m (ZH), foi necessário estimar a variação do tamanho da praia entre uma baixa-mar de águas vivas e uma preia-mar de águas vivas. Isto foi efectuado com base nas inclinações médias dos taludes submersos e por observação local. Por interpolação através das inclinações calculadas o valor procurado atingia um mínimo de 118m no talude mais inclinado na região mais a sul da área de intervenção, e por observação local estimou-se que essa rondaria os 80m na zona central. Sendo assim adoptou-se para toda a área de intervenção que, entre as diferentes marés, as praias poderiam aumentar em 100m.

Dos vários tipos de praia que são apresentados pelo referido método, o que se aproxima mais das praias deste projecto é o tipo C, com a diferença que a praia do tipo C possui uma inclinação de 1/15 e para as praias em estudo foi adoptada uma de 1/50 para possibilitar a utilização das curvas da figura 3.11. Apesar disso o parâmetro SAR foi determinado como se de uma praia do tipo C se tratasse.

Para definição do quociente de área de saliência foi efectuada uma regressão do segundo grau aos pontos da figura 3.13 tendo sido encontrada a expressão 5.1.

$$SAR = -0,2189 \frac{d'^2}{d_{b5}} + 0,1094 \frac{d'}{d_{b5}} + 0,7565 \quad (5.1)$$

Considerou-se então uma inclinação de praia de 2%, uma altura de onda de 7,14m, um comprimento da linha de costa a proteger de 1,5km e que a praia é do tipo C, resultando que as estruturas se deveriam localizar a 450m da costa, para uma profundidade de 9,0m, dando origem a uma saliência de 323m. Logo, a 350m, para as distâncias na batimetria, e a uma cota de fundação de -5,0m (ZH).

Estando a estrutura a 450m da linha de costa, as dimensões propostas pelo método eram de um comprimento de 400m e um espaçamento entre as duas estruturas de 230m. Mas, para haver uma melhor compatibilização com os perfis ao longo de toda a área de intervenção adoptou-se uma distância de 300m (400m para o cálculo da saliência), o que deu origem a uma saliência de 287m de largura. Porém, para a estrutura localizada mais a sul não havia perfis em que para essa distância se verificasse a cota de -5,0m (ZH). Para que se mantivesse a profundidade média de implantação a estrutura teria que ser colocada a 200m da cota (300m para o cálculo da saliência), contudo isso não seria compatível com o método, quadro 5.17.

Quadro 5.17 – Resultados do método JMC para as várias profundidades.

| $X'_{PMAV}$ | $X'_{BMAV}$ | d (m) | $X'_S$ (m) | z (m) (ZH) | $L_S$ (m) | $L_g$ (m) |
|-------------|-------------|-------|------------|------------|-----------|-----------|
| 450         | 350         | 9,0   | 287        | -5,0       | 400       | 230       |
| 400         | 300         | 8,0   | 294        | -4,0       | 355       | 285       |
| 300         | 200         | 6,0   | 300        | -3,0       | 207       | 165       |

Perante estas incompatibilidades com a batimetria, optou-se por colocar as estruturas a diferentes distâncias da linha de costa, mesmo que implicando que uma delas esteja a uma profundidade superior à indicada pelo método. Assim uma estrutura estará a 300m da linha de costa, a uma profundidade de 9,0m, e a outra estará a 200m da linha de costa, à mesma profundidade. O comprimento das duas estruturas será de 400m e a abertura entre elas de 230m, medidos na direcção paralela à linha de costa.

#### 5.5.2.2. Coeficiente de transmissão

Um factor cuja importância tem vindo a ser referida ao longo deste projecto é a diminuição da agitação junto à costa. Para isso é necessário conhecer o coeficiente de transmissão dos quebramares, em que também foi baseada a escolha da cota de coroamento.

Para o cálculo deste parâmetro, existem variáveis importantes em qualquer método que seja aplicado, relacionado com a agitação. Contrariamente ao adoptado para o dimensionamento estrutural, a altura

de onda aqui utilizada foi a altura de onda significativa, que localmente é de aproximadamente 4,0m, estando a ela associado um período de 11,2s, portanto um comprimento de onda de 196m. Foram calculados os coeficientes de transmissão relativos às duas cotas de coroamento consideradas, e para as dimensões já indicadas, ou seja, largura de coroamento de 10,5m e blocos de 90kN, ou seja diâmetro médio de 1,73m. Para estas condições foram aplicados os critérios apresentados em 3.1.1.

No método de van der Meer e Daemen, verifica-se que o coeficiente de transmissão para a cota de +4,0m está fora do intervalo de aplicabilidade. Para a situação do coroamento a +3,5m (ZH) também não é aplicável já que  $R_c < 0$ . Para os restantes métodos apresenta-se de seguida os cálculos para a cota de coroamento de +3,5m (ZH) em primeiro lugar e depois para +4,0m (ZH), quadros 5.20 e 5.21.

Para o cálculo do coeficiente por Briganti *et al.* foi utilizada a equação 3.1, já que  $B/H_i < 10$ , tendo resultado um coeficiente de transmissão de 0,443, que está dentro do intervalo de 0,07 e 0,80.

Como exposto no capítulo 3, para o método de Ahrens, a altura a considerar é a da onda significativa em águas profundas, e por isso foi utilizado o valor registado em Leixões de 4,40. Além disso o nível da água do mar considerado foi o nível médio, +2,0m (ZH), logo no caso da cota de coroamento de +3,5m (ZH)  $R_c$  será de 1,5m e não de -0,5m. O resultado deste método foi de 0,817. Como se percebe pelos valores de  $(K_t)_{através}$  e  $(K_t)_{sobre}$  a transmissão é efectuada principalmente por galgamento como seria de esperar devido à baixa cota de coroamento.

Finalmente, para o método desenvolvido por Taveira Pinto foi verificado o valor do coeficiente de transmissão através do coeficiente adimensional  $R^*$  e através da altura de onda significativa, sendo calculado como interpolação baseada nas expressões relativas às curvas para  $T=1,0$  e  $T=1,25$  com escalas de 1/100, ou seja para os períodos de 10 e 12,5 segundos, quadros 5.18 e 5.9. Para a cota de coroamento de 3,5m (ZH) o valor de  $R^*$  não é nulo, mas dele resultam valores de  $K_t$  inferiores aos indicados para  $R^*$  é nulo. Por isso  $K_t$  será igual nos dois casos.

Quadro 5.18 – Coeficiente de transmissão por Taveira Pinto para  $z_c=+3,5m$  (ZH).

| Critério                         | Curva adoptada |       | Parametro de cálculo | $K_t$ |      |
|----------------------------------|----------------|-------|----------------------|-------|------|
| $R^*$ : $10s \leq T_p \leq 12,5$ | $T = 1,0$      | 1/100 | $R^*=0,008$          | 0,42  | 0,48 |
|                                  | $T = 1,25$     | 1/100 | $R^*=0,006$          | 0,55  |      |
| $H_s$ : $10s \leq T_p \leq 12,5$ | $T = 1,0$      | 1/100 | $H_s=3,99$           | 0,70  | 0,70 |
|                                  | $T = 1,25$     | 1/100 | $H_s=3,99$           | 0,70  |      |

Quadro 5.19 – Coeficiente de transmissão por Taveira Pinto para  $z_c=+4,0m$  (ZH).

| Critério                         | Curva adoptada |       | Parametro de cálculo | $K_t$ |      |
|----------------------------------|----------------|-------|----------------------|-------|------|
| $R^*$ : $10s \leq T_p \leq 12,5$ | $T = 1,0$      | 1/100 | $R^*=0,000$          | 0,54  | 0,55 |
|                                  | $T = 1,25$     | 1/100 | $R^*=0,000$          | 0,57  |      |
| $H_s$ : $10s \leq T_p \leq 12,5$ | $T = 1,0$      | 1/100 | $H_s=3,99$           | 0,70  | 0,70 |
|                                  | $T = 1,25$     | 1/100 | $H_s=3,99$           | 0,70  |      |

Quadro 5.20 – Coeficientes de transmissão para  $z_c=+3,5\text{m}$  (ZH).

| Critério               | Parâmetros de cálculo    |                 | Coeficiente de transmissão |
|------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|
| Briganti <i>et al.</i> | $R_c/H_i$                | -0,13           | 0,44                       |
|                        | $B/H_i$                  | 2,6             |                            |
|                        | $\xi_{op}$               | 3,50            |                            |
| Ahrens                 | $A_t$                    | $214\text{m}^3$ | 0,82                       |
|                        | $f_{\text{através}}$     | 5,228           |                            |
|                        | $f_{\text{sobre}}$       | 0,976           |                            |
|                        | $(K_t)_{\text{através}}$ | 0,161           |                            |
|                        | $(K_t)_{\text{sobre}}$   | 0,506           |                            |
| Taveira Pinto          | $R^*$                    | 0,0071          | 0,55                       |
|                        | $H_r$                    | 0,0032          | 0,70                       |

Quadro 5.21 – Coeficientes de transmissão para  $z_c=+4,0\text{m}$  (ZH).

| Critério               | Parâmetros de cálculo    |                 | Coeficiente de transmissão |
|------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|
| Briganti <i>et al.</i> | $R_c/H_i$                | 0               | 0,39                       |
|                        | $B/H_i$                  | 2,6             |                            |
|                        | $\xi_{op}$               | 3,50            |                            |
| Ahrens                 | $A_t$                    | $235\text{m}^3$ | 0,78                       |
|                        | $f_{\text{através}}$     | 5,283           |                            |
|                        | $f_{\text{sobre}}$       | 1,261           |                            |
|                        | $(K_t)_{\text{através}}$ | 0,159           |                            |
|                        | $(K_t)_{\text{sobre}}$   | 0,442           |                            |
| Taveira Pinto          | $R^*$                    | 0               | 0,55                       |
|                        | $H_s$                    | 3,99            | 0,70                       |
|                        | $H_r$                    | 0,0032          |                            |

Relativamente aos resultados obtidos para o coeficiente de transmissão com base no método de Taveira Pinto, quando este foi calculado com base na altura de onda significativa,  $K_t$  tem um valor mais conservativo, próximo do coeficiente de transmissão de Ahrens. Já o valor para Briganti *et al.* apresenta-se como o menor nos dois casos.

Comparando os valores quando se aumenta apenas em 0,5 a altura da estrutura, entende-se que se se adoptasse para cota de coroamento +4,5m (ZH) não haveria grandes alterações e aumentariam os impactes paisagísticos. Note-se que o valor mais elevado, resultante da fórmula de Ahrens só se

alterou 5% e mesmo o menor valor, resultado da fórmula de Briganti *et al.*, tendo sido o que mais se alterou apenas diminuiu cerca de 10%.

### 5.5.2.3. Métodos empíricos

Definida a posição das estruturas foi avaliada a resposta da linha de costa face à construção das mesmas. Para isso foram consideradas as quatro situações existentes, conjugando as cotas de coroamento de +3,5m (ZH) e de +4,0m (ZH) com as duas posições, 300 e 400 metros. Apresenta-se neste ponto as respostas apenas para a cota de +4,0m (ZH), e no anexo A7 para as cotas de +3,5m (ZH) e +4,5m (ZH).

Para aplicação dos vários métodos foi necessário determinar ainda mais alguns parâmetros e tratá-los juntamente com outros já definidos, quadro 5.22.

O coeficiente de transmissão adoptado foi o valor mais baixo de modo a verificar a acumulação de sedimentos nas piores condições, ou seja, se com este valor não se formar saliência esta também não se formará com valores mais elevados do coeficiente de transmissão.

Quadro 5.22 – Parâmetros intervenientes nos métodos empíricos

| Parâmetro de cálculo                                         | Valor adoptado |
|--------------------------------------------------------------|----------------|
| Altura de Onda ao Largo, (Leixões), $H_{máx,0}$              | 8,52m          |
| Comprimento de Onda na estrutura, $L$                        | 105,15m        |
| Profundidade da água (em preia-mar), $d$                     | 9,0m           |
| Coeficiente de transmissão, (Briganti <i>et al.</i> ), $K_t$ | 0,393          |
| Comprimento da estrutura, $L_s$                              | 400m           |
| Distância da estrutura à linha de costa original, $X$        | 400m           |
|                                                              | 300m           |
| Espaçamento entre estruturas, $L_g$                          | 230m           |
| Altura acima do $N_{PMAV}$ , $R_c$                           | 0m             |

Então tendo por base estes parâmetros, foram verificadas as várias condições do quadro 3.1. Daí resultaram as possíveis respostas para a linha de costa, quadros 5.23 e 5.24. Apesar de este projecto se tratar de um sistema de quebramares não foram deixados de fora os métodos relativos a um único quebramar. Em primeiro lugar porque, tratando-se de métodos empíricos, nunca são demais os métodos adoptados para melhorar a avaliação dos resultados. E em segundo lugar, porque a distância à linha de costa não é igual para as duas estruturas, nem o comprimento  $L_g$  indicado é o requerido pelos métodos, logo não se pode falar de um sistema de quebramares tradicional. Portanto, aquando da comparação final, não podem ser desprezados os resultados dos métodos para quebramares singulares.

Quadro 5.23 – Resposta da linha de costa para  $z_c=+4,0\text{m}$  (ZH) e  $X=400\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |               |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |               | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo       | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            | X             | X                      |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |               | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            | X             |                        |         |
| Ming e Chiew (2000)                           | X                          |               |                        |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            | X             |                        |         |
| Gourlay (1981)                                |                            | X             |                        |         |
| Black e Andrews (2001)                        |                            | Não aplicável |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          |                            | Não aplicável |                        |         |

Quadro 5.24 – Resposta da linha de costa para  $z_c=+4,0\text{m}$  (ZH) e  $X=300\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |               |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |               | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo       | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            | X             |                        |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |               | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            | X             |                        |         |
| Ming e Chiew (2000)                           | X                          |               |                        |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            | X             |                        |         |
| Gourlay (1981)                                |                            | X             |                        |         |
| Black e Andrews (2001)                        |                            | Não Aplicável |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          |                            | Não Aplicável |                        |         |

Além dos métodos cujos resultados estão apresentados no quadro anterior, foi também estudada a resposta da linha de costa por Pope e Dean (1986) através da figura 3.1. O parâmetro  $L_s/L_g$  tem valor constante de 1,7 por só depender de características das estruturas e o parâmetro  $X/d$  tem valores de 33,3 quando o quebramar se encontra a 300m e de 44,4 quando se encontra a 400m. Logo, segundo a figura 3.1 ocorrerá a formação de saliência. Foi ainda aplicada a expressão proposta por Ahrens e Cox (1990), equação 3.21. Como resultado dessa equação I tem o valor de 2,74 para todos os casos já que

só depende do comprimento da estrutura e do espaçamento entre os dois segmentos. Sendo este valor próximo de 3 considera-se que se formará uma saliência bem desenvolvida.

Perante estes resultados é notório que não há grande diferença nas respostas devido à variação da distância à linha de costa. Apesar de nesta fase já estar quase decidida a solução a adoptar, através do quadro 5.25 foi possível avaliar mais atentamente as respostas para cada caso.

Quadro 5.25 – Respostas da linha de costa para as diferentes cotas de coroamento e distâncias à linha de costa.

| Cota de coroamento (ZH) (m) | Distância à linha de costa original (m) | Respostas para um quebramar singular |          | Respostas para um sistema de quebra-mares |          |
|-----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|----------|-------------------------------------------|----------|
|                             |                                         | Saliências                           | Tômbolos | Saliências                                | Tômbolos |
| +3,50                       | 400                                     | 3                                    | 1        | 3                                         | 0        |
|                             | 300                                     | 3                                    | 1        | 3                                         | 0        |
| +4,00                       | 400                                     | 2                                    | 4        | 4                                         | 0        |
|                             | 300                                     | 2                                    | 4        | 3                                         | 0        |
| +4,50                       | 400                                     | 2                                    | 4        | 4                                         | 0        |
|                             | 300                                     | 2                                    | 4        | 3                                         | 0        |

Do quadro apresentado resulta mais um factor que influenciou a exclusão da cota de coroamento de +4,5m (ZH), já que entre esta e aquela adoptada não há nenhum acréscimo no que diz respeito à formação de tómbolo ou saliência.

#### 5.5.2.4. Forma da praia a sotamar da estrutura

Como foi referido em 3.1.2 alguns dos autores cujo método foi utilizado apresentam também expressões para cálculo da dimensão da saliência. Recorrendo a essas expressões foi possível determinar a área da saliência. Para isso foi também utilizado o método de González e Medina que possibilita não só conhecer a área da saliência como a sua forma.

Pelos parâmetros anteriormente apresentados para os métodos empíricos é possível aplicar as expressões 3.19 e 3.20. Pela primeira, que é apresentada por Suh e Dalrymple (1987) resulta que a saliência terá uma largura de aproximadamente 300m quando a estrutura se localizar a 300m da linha de costa original ou de 400m quando aquela distância for de 400m. Verifica-se assim o indicado nos quadros 5.23 e 5.24, que é possível a formação de um tómbolo. É conveniente lembrar que a resposta indicada nesses quadros é para quebra-mares singulares e que a equação agora aplicada é para múltiplos quebra-mares, vindo assim confirmar o que se referiu relativamente aos métodos de quebra-mares singulares.

Para a expressão apresentada por Ming e Chiew (2000) resulta que a área da saliência variará entre 57000m<sup>2</sup> e 65000m<sup>2</sup>, aproximadamente, para as distâncias de 300 e 400 metros da linha de costa, respectivamente. Além desses foi determinada a dimensão da saliência pelas relações propostas por Black e Andrews para recifes, tendo sido calculada a distância entre a estrutura e a saliência e o comprimento de praia alterado  $D_{tot}$ , sendo que a relação  $Y_{off}/D_{tot}$  deverá estar entre 0,105 e 0,145, quadro 5.26.

Quadro 5.26 – Características da saliência, Black e Andrews (2001).

| X (m) | L <sub>s</sub> (m) | X <sub>off</sub> (m) | Y <sub>off</sub> (m) | D <sub>tot</sub> (m) |
|-------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 400   | 400                | 200                  | 200                  | 1380                 |
| 300   | 400                | 139                  | 161                  | 1112                 |

As características da saliência foram calculadas pelos três métodos apesar, de só o proposto por Black e Andrews ser aplicável à cota de coroamento de +3,5m (ZH) e os outros dois à de +4,0m (ZH). Como a cota das estruturas não será constante optou-se por efectuar uma primeira aproximação recorrendo aos três métodos. Mesmo para a cota de +3,5m (ZH) a estrutura só estará submersa quando a maré for superior a esse valor, podendo mesmo em preia-mar estar emersa.

Através da metodologia de González e Medina determinou-se não só a resposta da linha de costa, mas também as suas características geométricas. Isso foi efectuado com base nas características do quebramar destacado e nas variáveis da figura 3.3, sendo que foi calculado pela equação 3.22, quadro 5.27.

Os parâmetros presentes na figura 3.6, juntamente com a mesma, permitiram perceber que no caso em estudo seria de esperar a formação de um tómbolo. No caso de se verificar a formação desse tómbolo as relações  $B_k/B$  e  $B_1/L$  possibilitaram conhecer a largura de ligação do tómbolo à estrutura,  $2B_k$ , e do comprimento de praia afectado,  $2B_1$ , quadro 5.28.

Quadro 5.27 – Parâmetros de cálculo para a forma de equilíbrio estático a sotamar da estrutura,

| Parâmetro de cálculo                                | Valor adoptado |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| Distância da estrutura à linha de costa original, Y | 400m           |
| Altura de onda em águas profundas, H <sub>012</sub> | 8,00m          |
| Período de onda, T <sub>012</sub>                   | 19,8s          |
| Comprimento de Onda na estrutura, L                 | 186m           |
| Profundidade da água (em preia-mar), d              | 9,0m           |
| Comprimento da estrutura, 2B                        | 400m           |
| $\beta_r$                                           | 2,13°          |
| $\alpha_{min}$                                      | 50°            |
| B                                                   | 40°            |
| R <sub>0</sub>                                      | 610m           |

Quadro 5.28 – Características geométricas do tómbolo.

| X (m) | B <sub>1</sub> (m) | B <sub>1</sub> /L | B/L  | B <sub>k</sub> /B | 2B <sub>k</sub> (m) | 2B <sub>1</sub> (m) |
|-------|--------------------|-------------------|------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 461,6 | 661,6              | 3,56              | 1,08 | 0,20              | 80                  | 1324                |

Os resultados para  $Y=300\text{m}$  apontam também para a formação de um tómbolo, sendo a largura de ligação ao quebramar destacado igualmente de  $80\text{m}$ , mas o comprimento de praia afectado de  $1227\text{m}$ .

Na verdade, não se pode afirmar que se formará uma saliência ou um tómbolo apenas por transporte sedimentar já que naquela região esse não é significativo, indo directamente para sul do Rio Douro ou para grandes profundidades devido à presença do porto de Leixões. Uma hipótese a ponderar seria a alimentação artificial das praias locais. Para isso é necessário estimar o volume de areia a transportar para o local.

Uma vez que os comprimentos de praia afectados resultantes da metodologia de González e Medina (2001) são demasiado elevados para a praia em questão, procurou-se calcular esse comprimento com base na área de saliência resultante da equação de Ming e Chiew (2000) e nos resultados da forma de equilíbrio. Estes resultados são para saliências, porém a relação que indica a formação de saliência ou tómbolo iguala o limite de transição quando o quebramar destacado se encontra a  $300\text{m}$  da costa, ou seja  $X/L_s=0,8$ . Então, aproximando a forma do tómbolo a um trapézio foi calculado o comprimento de praia afectado, quadro 5.29.

Quadro 5.29 – Comprimento de praia afectado com base em resultados de González e Medina e Ming e Chiew.

| Distância à linha de costa, $Y$ (m) | Largura de ligação ao tómbolo, $2B_k$ (m) | Área em planta, $A$ ( $\text{m}^2$ ) | Comprimento de praia afectado, $2B_1$ (m) |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| 300                                 | 80                                        | 56903                                | 300                                       |
| 400                                 | 80                                        | 64960                                | 245                                       |

O facto de o comprimento ser inferior ao desenvolvimento da estrutura em ambos os casos leva a crer que não haverá formação de tómbolo mas de saliência. Por esse motivo foi efectuado um segundo cálculo, agora com base nos valores resultantes de  $Y_{\text{off}}$  de Black e Andrews, quadro 5.25, e nos mesmos valores da área em planta, quadro 5.30. Neste caso aproximou-se a forma da saliência a um triângulo.

Quadro 5.30 – Comprimento de praia afectado com base em resultados de Black e Andrews e Ming e Chiew.

| Distância à linha de costa, $X$ (m) | Largura da saliência, $Y_{\text{off}}$ (m) | Área em planta, $A$ ( $\text{m}^2$ ) | Comprimento de praia afectado, $D_{\text{tot}}$ (m) |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 300                                 | 161                                        | 56903                                | 707                                                 |
| 400                                 | 200                                        | 64960                                | 650                                                 |

Assim, tendo em conta esses resultados e adoptando uma inclinação média do talude de praia de  $1/50$ , valor utilizado no método JMC, calculou-se o volume de areia a colocar. Devido à forma irregular da saliência, considerou-se que cada saliência era a junção de duas cunhas. Foram obtidos valores de aproximadamente  $61100\text{m}^3$  para o quebramar localizado a  $300\text{m}$  e de  $86700\text{m}^3$  para o outro, sendo o volume total de aproximadamente  $150000\text{m}^3$ . No anexo A8 apresenta-se detalhadamente o cálculo deste volume e uma aproximação em planta do que será a praia após a formação das saliências. Como resultado da alimentação das praias poderá resultar a formação representada na figura 5.1.

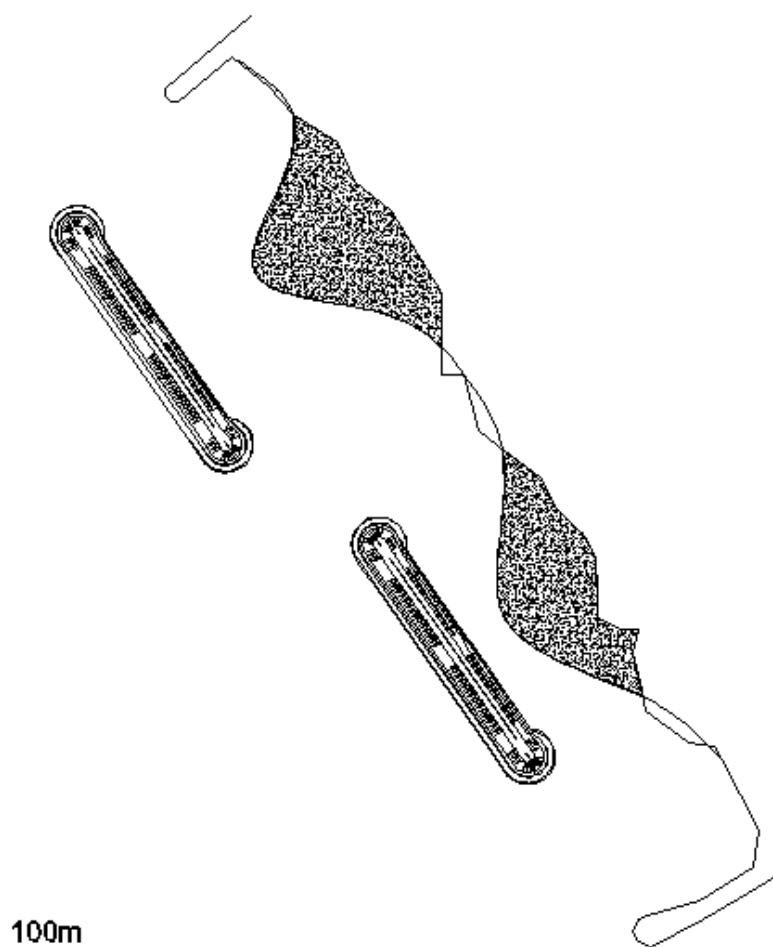


Fig. 5.1 – Saliências após a alimentação artificial das praias.

## 5.6. MÉTODO CONSTRUTIVO

A construção de um quebramar destacado está dependente de vários factores locais não só de carácter marítimo mas também ambiental. Aquando da programação da construção é necessário ter em atenção aspectos como a amplitude de maré no local, o clima de agitação, não esquecendo o transporte e armazenamento dos materiais. O planeamento deve também ser realizado com base nos equipamentos disponíveis.

Neste ponto pretende-se somente apresentar algumas possibilidades de construção de acordo com o conhecimento actual do local. A programação final da obra deverá ficar a cargo do empreiteiro já que este terá fazer um reconhecimento do local e efectuar opções de acordo com os equipamentos disponíveis.

A construção pode ser efectuada por via marítima ou por via terrestre, sendo aconselhável a construção por terra quando as estruturas estejam a pequenas profundidades e pouco distantes da costa e a construção por mar quando se verificarem grandes profundidades e águas calmas. Se se optar pela via marítima poderá não haver necessidade de um local de armazenamento muito próximo, já se se optar por construir por terra, além de um local de armazenamento é necessário verificar as acessibilidades. Muitas vezes a melhor opção será a conjugação dos dois métodos, já que a via marítima só é possível quando a maré o permite.

Quando a construção for realizada por terra é necessária a construção prévia de uma plataforma de acesso ao local de implantação. Essa deverá ser realizada de modo a minimizar os impactos ambientais e num local onde seja fácil o acesso do equipamento a essa plataforma.

Para o projecto em questão, devido às baixas profundidades e à amplitude de maré a construção deverá ser essencialmente efectuada por terra. Assim será possível garantir a continuidade dos trabalhos, não estando dependentes da maré. Além disso as baixas profundidades dificultariam a aproximação de equipamentos marítimos ao local de implantação.

Sendo a região uma zona urbana já consolidada, existem boas acessibilidades, porém será difícil a criação de um estaleiro para a execução da obra. Para não haver grandes alterações no tráfego local uma possibilidade é a utilização do passeio da Avenida Brasil que pela sua largura possui características que permitem a criação de uma zona de armazenamento, principalmente na meia-laranja junto ao Molhe de Carreiros. Também a norte desse molhe existe uma praia com maior volume de areia que também poderá ser usada como local de armazenamento. Uma outra possibilidade é a utilização do local que foi utilizado para a instalação do estaleiro dos Molhes do Douro.

Se se optar por utilizar esses locais para armazenamento, é necessário ter em atenção o prazo de execução da obra, pois não é conveniente que decorra durante mais que uma época balnear. De facto, durante a construção, será diminuta a frequência da população àquela parte da cidade, afectando negativamente as actividades económicas locais.

Relativamente à plataforma de acesso pretende-se que seja possível a circulação do equipamento num único sentido, sendo aconselhável por isso uma largura de 7m. Uma vez que parte da construção decorrerá durante o inverno, a plataforma deverá estar a uma cota superior ao nível de preia-mar de águas vivas. Sendo a cota de coroamento da estrutura de +4,0m (ZH), em princípio não será necessário que a plataforma esteja acima de +5,0m (ZH).

Devido às formações rochosas nem sempre é possível o acesso entre as diferentes praias. Uma vez que a realização de duas plataformas já era obrigatória, sugere-se que haja dois locais distintos de entrada. Um junto ao Molhe de Carreiros, já que existem rampas de acesso por onde podem circular os equipamentos. E outro na Praia dos Ingleses, através das ruas de cota mais baixa através das quais há ligação à praia. Também poderá ser estudada a hipótese de efectuar esse acesso junto ao Molhe de Felgueiras. É conveniente que as plataformas sejam desenvolvidas de modo a que a construção se inicie pelo centro dos quebra-mares e não pelas cabeças, por isso terá que haver circulação nas praias.

Quando for necessária a circulação na praia, no percurso a realizar poderá ser colocado geossintético coberto por uma camada de *tou-venant*. A plataforma deve ser constituída por um núcleo com enrocamento TOT e um manto resistente com blocos dentro da classe de 3 a 5 toneladas. Tratando-se apenas de uma construção provisória, de forma a diminuir o volume de material utilizado, os taludes deverão ter uma inclinação de 1:1. A execução destes caminhos deve ser efectuada com os cuidados próprios para durar o tempo de toda a obra. Recorrendo a camiões “dumper” e giratórias, iniciar-se-á a colocação do núcleo das plataformas com a compactação desejada. À medida que se avança, deverão ser colocados os blocos de protecção.

O que se apresenta aqui não é mais que uma sugestão, pois não se dispensa uma avaliação mais aprofundada do local para instalar as plataformas e os pontos de acesso nos melhores locais.

Relativamente à construção dos quebra-mares destacados, havendo equipamento disponível, os dois devem ser executados em simultâneo, e cada um de forma simétrica de modo a diminuir a duração da obra. A plataforma de construção deve acompanhar o quebramar, tendo uma largura igual à do coroamento da estrutura principal para permitir a instalação das gruas que colocarão os blocos do

manto resistente e executarão a fundação e risberma. Naturalmente que antes da colocação dos blocos das subcamadas e do manto resistente deverá ser executado o núcleo, com auxílio a camiões tal como na plataforma de acesso. Terminada a execução dos taludes e das cabeças, é necessário proceder à colocação dos blocos do coroamento. Para isso é necessário que, à medida que os equipamentos recuam, seja retirado o material em excesso e colocados os blocos para atingir as cotas desejadas. O material retirado poderá ser utilizado para reforçar a fundação e em pequenos remates do coroamento, se necessário.

A colocação do material que ficará submerso poderá ser acompanhada por via marítima, sendo aconselhável a presença de mergulhadores experientes.

## 5.7. MAPA DE QUANTIDADES E MEDIÇÕES

Com o objectivo de calcular o volume de material a utilizar na construção dos quebramares destacados, foi realizado de forma aproximada o cálculo do volume de material a utilizar por classe do mesmo. Para isso a estrutura foi separada em diversas secções, consoante a classe de blocos e a sua geometria. Para definição das classes e a geometria da risberma foram tidas em conta as indicações da figura 3.17. Nos quadros 5.31 a 5.33 apresenta-se os valores para cada secção e no quadro 5.34 apresenta-se os volumes totais, para cada classe, relativos às duas estruturas. Os valores relativos à secção da cabeça apresentados consideram já as duas extremidades da estrutura. No que diz respeito ao núcleo e à fundação, ambos serão constituídos por enrocamento TOT com um volume aproximado de 75700m<sup>3</sup>.

Os valores apresentados não passam de aproximações, pois dependendo das batimétricas reais o volume necessário poderá variar.

Quadro 5.31 – Classes e volumes relativos ao manto resistente.

| Localização | Classe (kN) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------|--------------------------|
| Barlamar    | 70 – 115    | 22050                    |
| Sotamar     | 70 – 115    | 17406                    |
| Coroamento  | 70 – 115    | 14560                    |
| Cabeça      | 90 - 120    | 5395                     |

Quadro 5.32 – Classes e volumes relativos à subcamada.

| Localização | Classe (kN) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------|--------------------------|
| Barlamar    | 5 – 15      | 8340                     |
| Sotamar     | 5 – 15      | 6645                     |
| Coroamento  | 5 – 15      | 9985                     |
| Cabeça      | 5 – 15      | 945                      |

Quadro 5.33 – Classes e volumes relativos à risberma.

| Localização        | Secção   | Classe (kN) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|----------|-------------|--------------------------|
| Risberma anterior  | Corrente | 15 – 25     | 2400                     |
|                    | Cabeça   | 20 - 30     | 1215                     |
| Risberma posterior | Corrente | 5 – 15      | 1536                     |
|                    | Cabeça   | 5 – 15      | 600                      |

Quadro 5.34 – Volumes totais por classe.

| Classe (kN) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|-------------|--------------------------|
| TOT         | 75700                    |
| 5 – 15      | 28051                    |
| 90 – 120    | 5395                     |
| 15 – 25     | 2400                     |
| 20 – 30     | 1215                     |
| 70 - 115    | 54016                    |

# 6

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um projecto de uma obra de protecção costeira está sempre dependente de um estudo de viabilidade e de um estudo de impacte ambiental.

A viabilidade desta obra está associada não só aos aspectos técnicos não referidos neste relatório, que podem impossibilitar a construção dos quebramares destacados, mas também a factores económicos, pois o investimento para a realização desta obra pode não compensar face aos resultados esperados, dado que o investimento não pode ser pensado apenas para a construção, mas tem que ter em conta as várias intervenções de manutenção ao longo da vida das estruturas.

Durante o projecto foram tidos em conta alguns aspectos, de modo a tentar minimizar os impactes negativos relacionados com a construção das estruturas, nomeadamente no que diz respeito à qualidade da água e à paisagem. Num estudo completo devem ser avaliados todos os tipos de impactes aplicáveis, nomeadamente os de natureza ambiental e os de natureza social. Neste caso é possível referir alguns impactes positivos e negativos que se podem classificar como paisagísticos, morfológicos, ambientais e socioeconómicos.

Como impactes positivos verifica-se em primeiro lugar a melhoria das condições balneares, pelo aumento da largura de praia e pela diminuição da acção da agitação junto à praia. Associado a essa melhoria está também o facto de mais população afluir ao local nas horas de lazer, que irão usufruir do comércio local, trazendo mais benefícios para a região. Com o passar do tempo é esperada a instalação de novas espécies vegetais e animais junto da estrutura, surgindo assim novas colónias que trazem um enriquecimento biológico ao local.

Contudo, os impactes negativos nunca são anulados. No caso já referido da paisagem, apesar de a cota de coroamento ser baixa, em maré baixa irá sempre existir uma barreira no horizonte que não existia antes. Caso a praia seja alimentada artificialmente haverá impactes não só durante o tempo de execução dessa alimentação, mas também de uma grande alteração na paisagem e na morfologia, enquanto que se se tratasse de acumulação natural levaria a uma alteração mais gradual.

Percebe-se que há realmente a necessidade de estudar mais aprofundadamente os impactes causados pela construção destas duas estruturas de modo a ser possível fazer uma correcta avaliação dos mesmos e verificar a viabilidade desta construção.

Ainda com o intuito de avaliar a possibilidade de execução deste projecto deveria ser levado a cabo um estudo no qual fosse incluída a modelação numérica, para avaliar as correntes provocadas pela

existência das duas estruturas. Seria aconselhável também o estudo em modelo físico reduzido, neste caso permitindo avaliar mais pormenorizadamente fenómenos físicos que não são possíveis de modelar e a estabilidade das estruturas. Com estes estudos será possível corrigir falhas deste projecto, aumentando a qualidade das estruturas.

Pelo seu carácter académico foram adoptadas algumas simplificações que deveriam ser corrigidas se o projecto passasse além deste nível. As maiores simplificações relacionam-se com a batimetria, sendo de referir o facto de não ser o levantamento mais actual e de incluir apenas cotas negativas. Se um dia este projecto for executado é de grande importância a realização de um levantamento topohidrográfico do local.

Relativamente à forma e à orientação das estruturas, era interessante o estudo de outras hipóteses, que poderiam ser incluídas no estudo em laboratório, já que o cálculo não permite verificar fenómenos como erosão, nem avaliar correctamente a agitação a sotamar da estrutura.

Como em qualquer projecto do mesmo tipo não se pode deixar de contactar a população local. Este contacto poderá vir a facilitar a caracterização da região e a compreensão do problema a mitigar. Tendo sempre em atenção que perante um projecto com estas características haverá diversas opiniões, é necessário tomar precauções para que a população interfira de modo a facilitar e não impossibilitar a obra.

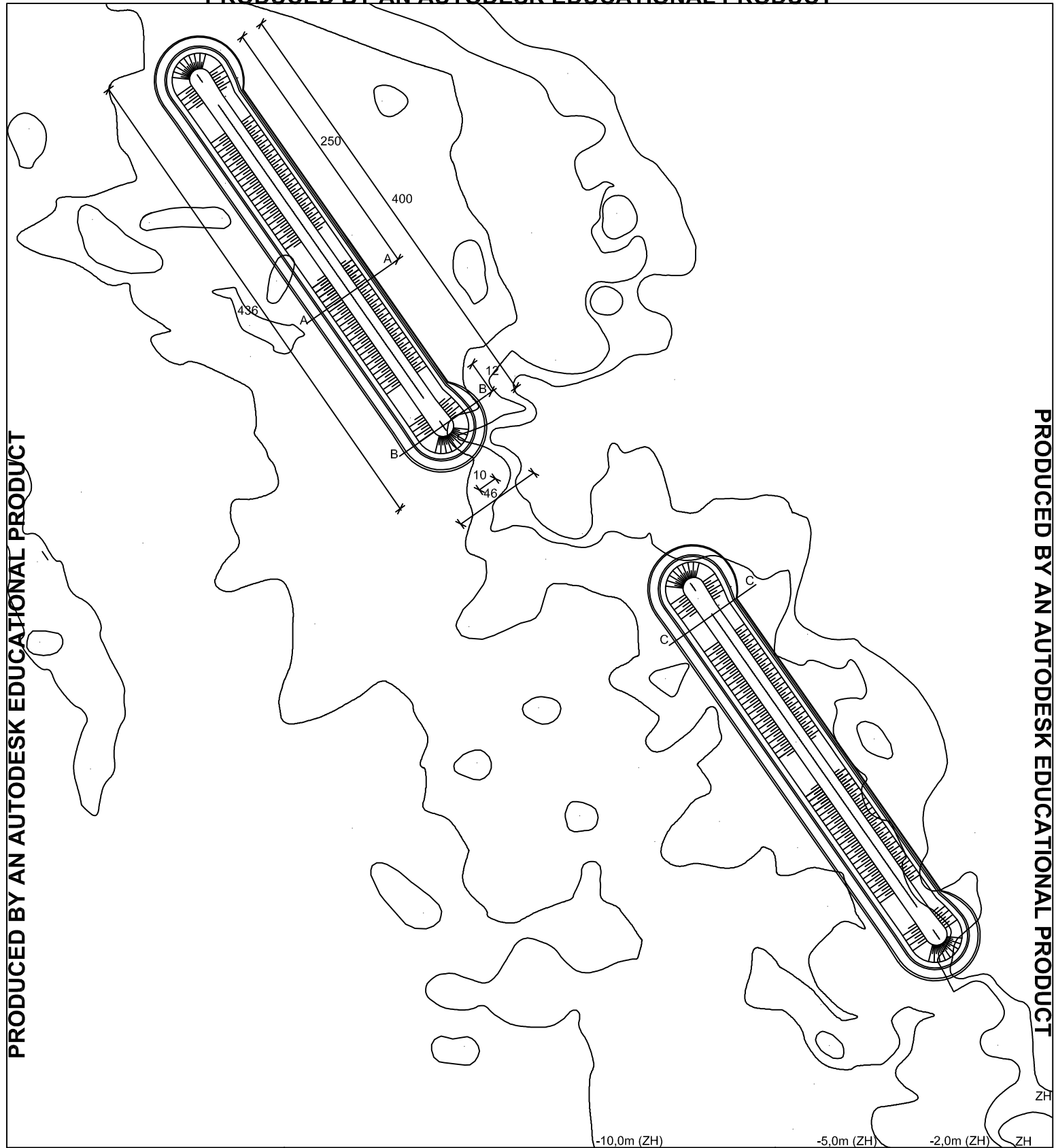
# 7

## PEÇAS DESENHADAS

Neste capítulo encontram-se as peças desenhadas referentes ao projecto apresentado. Os desenhos apresentados são relativos a diferentes secções das estruturas, sendo o corte AA referente ao perfil 9, o corte BB ao perfil 12 e o perfil CC ao perfil 19. Apresentam-se os seguintes desenhos:

- Desenho nº 1: Planta dos quebramares destacados;
- Desenho nº 2: Perfis transversais dos quebramares destacados, perfis AA e CC;
- Desenho nº 3: Perfil transversal da secção da cabeça do quebramar destacado, perfil BB.





-10,0m (ZH)

-5,0m (ZH)

-2,0m (ZH)

ZH

Mestrado Integrado em  
Engenharia Civil

Projecto de um sistema de  
quebramares destacados para a  
frente marítima da Foz do Rio  
Douro no Porto



Universidade do Porto  
**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

Sérgio Pedro de  
Matos Duarte

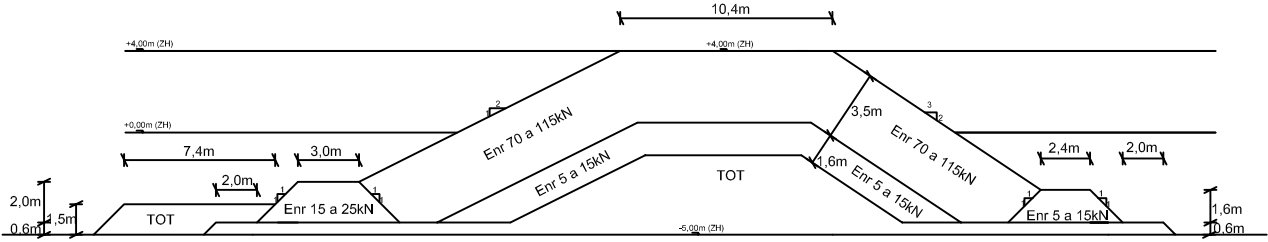
Planta dos quebramares  
destacados

Escala

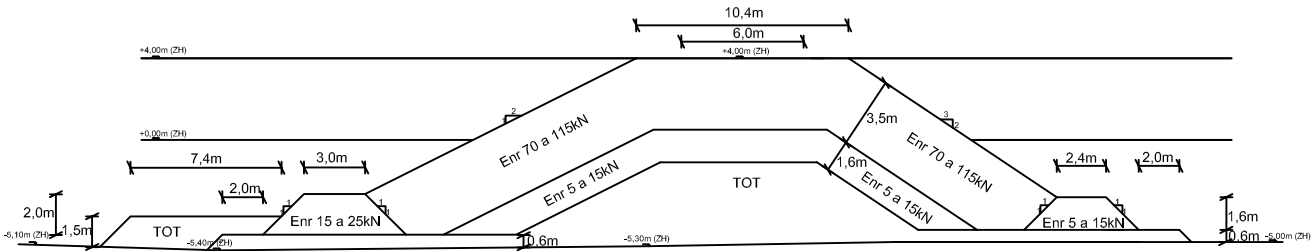
1/5000

nº1





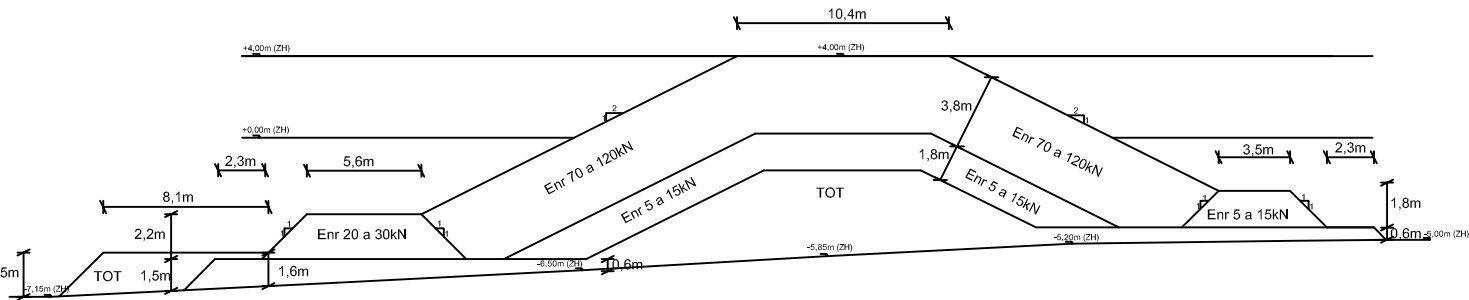
Perfil AA



Perfil CC

|                                        |                                                                                                      |                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Mestrado Integrado em Engenharia Civil | Projecto de um sistema de quebramares destacados para a frente marítima da Foz do Rio Douro no Porto |  Universidade do Porto<br><b>FEUP</b> Faculdade de Engenharia |     |
| Sérgio Pedro de Matos Duarte           | Perfis transversais dos quebramares destacados, perfis AA e CC                                       | Escala<br>1/400                                                                                                                                    | nº2 |





Perfil BB

|                                        |                                                                                                      |                 |     |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----|
| Mestrado Integrado em Engenharia Civil | Projecto de um sistema de quebramares destacados para a frente marítima da Foz do Rio Douro no Porto |                 |     |
| Sérgio Pedro de Matos Duarte           | Perfil transversal da secção da cabeça do quebramar destacado, perfil BB                             | Escala<br>1/400 | nº3 |



## BIBLIOGRAFIA

- Alfredini, P. (2005). Obras de defesa dos litorais – estimativa do impacto sobre a linha de costa. In *Obras e Gestão de Portos e Costas – a Técnica Aliada ao Enfoque Logístico e Ambiental*, 498-504, Edgard Blücher, São Paulo
- Alfredini, P. (2005). Obras de defesa dos litorais – tipos de obras. In *Obras e Gestão de Portos e Costas – a Técnica Aliada ao Enfoque Logístico e Ambiental*, 476-482, Edgard Blücher, São Paulo
- Branco, R. (1995). *Guias – Nevogilde*, Afrontamento, Porto
- Burcharth, H. F., Hawkins, S. J., Zanuttigh, B. e Lamberti, A. (2007). *Environmental Design Guidelines for Low Crested Coastal Structures*, Elsevier, Oxford.
- Correia dos Reis, A., Brazão Farinha, M., Brazão Farinha, J. P. (2007). Matemática. In *Tabelas técnicas*, 82-86, E.T.L., Lisboa
- Gonzalez, M., Medina, R., (2001). *On the application of static equilibrium bay formations to natural and man-made beaches*. Coastal Engineering, 43 (3–4), 209–225.
- Herbich, J.B. (2000). Offshore (detached) breakwaters. In *Handbook of Coastal Engineering*, pp 5.2-5.97, McGraw-Hill Handbooks, Texas, EUA.
- Hidrotécnica Portuguesa (1981). *Leixões - Cabo Mondego. Problemas litorais*. (Rel. não publicado)
- <http://dcm2.enr.state.nc.us>. Maio de 2009
- <http://diasquevoam.blogspot.com/> Maio de 2009
- <http://jf-fozdodouro.pt/> Maio de 2009
- [http://jn.sapo.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Porto&Concelho=Porto&Option=Interior&content\\_id=1121341](http://jn.sapo.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Porto&Concelho=Porto&Option=Interior&content_id=1121341). Maio de 2009
- <http://olhares.aeiou.pt>. Abril de 2009
- <http://picasaweb.google.com/pauloach>. Maio de 2009
- <http://portodocrime.blogspot.com> Junho de 2009
- <http://rosamarmore.blogspot.com>. Abril de 2009
- <http://www.encora.eu/coastalwiki>. Junho de 2009
- <http://www.inag.pt/>, Junho de 2009
- <http://www.jf-nevogilde.pt/> Maio de 2009
- Marques, H., Fernandes, J., Martins, L.P. (1990). *Porto – percursos nos espaços e memórias*. Afrontamento, Porto.
- Pereira, G. (2008). *Projecto de um Quebramar Destacado de Protecção para a Frente Marítima de Espinho*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pilaczyk, K.W., Zeidler, R. B., (1996). *Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control*. Taylor e Francis, Roterdão, Holanda
- Rosati, J. D., Truitt, C. L. (1990). *An alternative design approach for detached breakwaters projects*. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, EUA.

Silva, J., Flores, D. (2002) *Viagem ao Património Geológico da Faixa Litoral da Cidade do Porto*, Geologia no Verão 2002, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Silva, R., Coelho C., Veloso Gomes, F. e Taveira Pinto, F.(2008). *A importância de alguns parâmetros hidromorfológicos em estudos de modelação das zonas costeiras*. Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (FEUP), 31 de Outubro de 2008, FEUP, Porto

Taveira Pinto, F. (2001). *Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas Proximidades de Quebramares Submersos, sob a Acção da Agitação Marítima*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISSN 1677-4841

Taveira Pinto, F. (2003). *Dimensionamento Hidráulico e Estrutural de Quebramares de Taludes*. Trabalhos Marítimos 1, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Taveira Pinto, F. e Valente Neves, Ana C. (2003/2004). *Aspectos Ambientais e Físicos Relativos ao Usos de Quebramares Destacados para Fins de Protecção Costeira*. Gerenciamento Costeiro Integrado, Nº 3, Ano 2, pp 05-08, CTTMar UNIVALI, Santa Catarina, Brasil.

U.S. Army Corps of Engineers (2006). *Fundamentals of design*. In Coastal Engineering Manual - Coastal Geology, pp VI-5-1/VI-5-158, <http://chl.erdc.usace.army.mil/cemtoc>, Junho de 2009

U.S. Army Corps of Engineers (2006). *Types and functions of coastal structures*. In Coastal Engineering Manual - Coastal Geology, pp VI-2-1/VI-2-50, <http://chl.erdc.usace.army.mil/cemtoc>, Junho de 2009





## **ANEXOS**

Anexo A1 – Levantamento topo-hidrográfico abrangendo a região desde o Rio Douro até ao Porto de Leixões, 2002, à escala 1/50000. Fonte: IHRH, FEUP.

Anexo A2 – Perfis transversais da zona em estudo (4 a 31)

Anexo A3 – Fotografias da zona em estudo entre Fevereiro e Maio de 2009.

Anexo A4 – Perfil longitudinal exemplo do quebramar, à escala

Anexo A5 – Cálculo dos números de estabilidade  $N_s$  para o método de Vidal *et al.*

Anexo A6 – Planta da região com os quebramares.

Anexo A7 – Resultados dos métodos empíricos para as cotas de +3,5m (ZH) e de +4,5m (ZH).

Anexo A8 – Cálculo do volume de areia para alimentação artificial

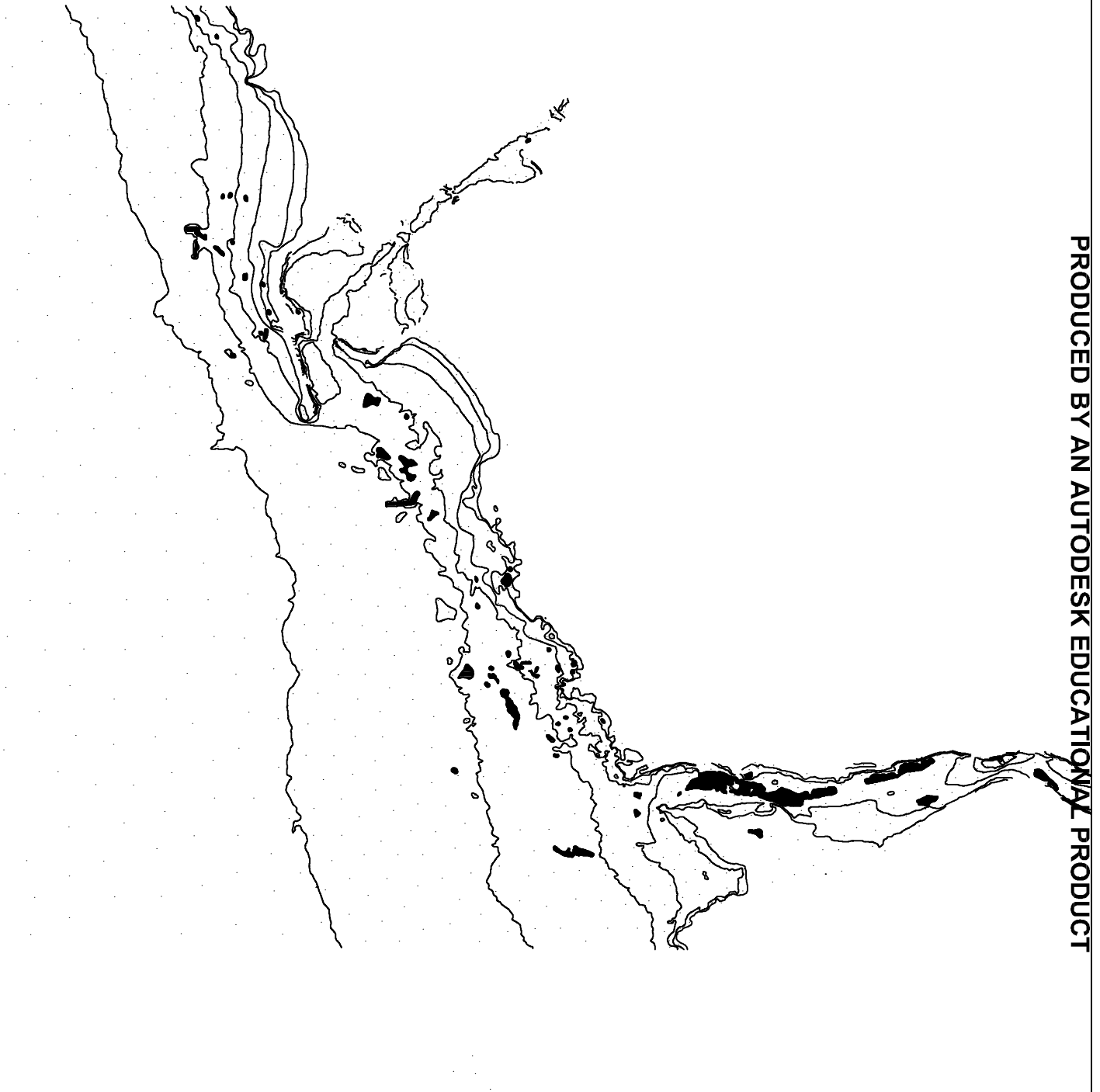


**A1**

**LEVANTAMENTO TOPO-  
HIDROGRÁFICO ABRANGENDO A  
REGIÃO DESDE O RIO DOURO ATÉ  
AO PORTO DE LEIXÕES, 2002, À  
ESCALA 1/50000.**

**FONTE: IHRH, FEUP**





A1.1 - Levantamento Topohidrográfico, abrangendo a região desde o Rio Douro até ao Porto de Leixões



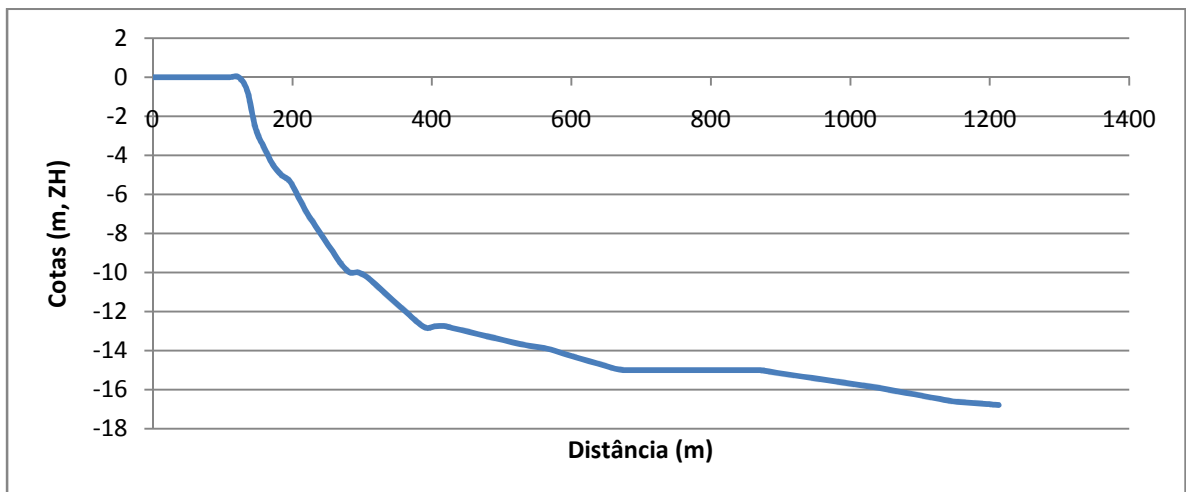
**A2**

**PERFIS TRANSVERSAIS DA ZONA  
EM ESTUDO**

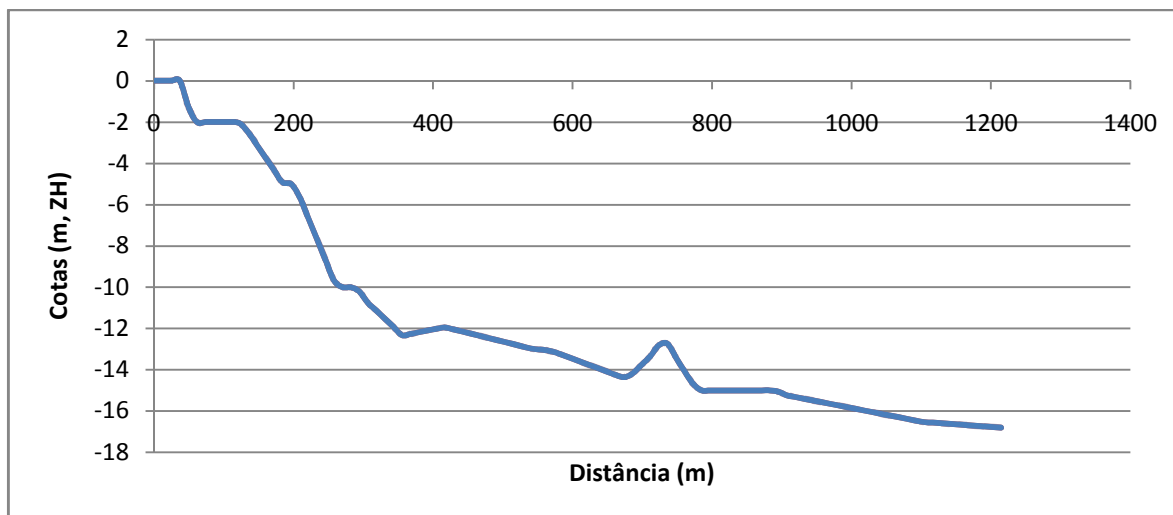




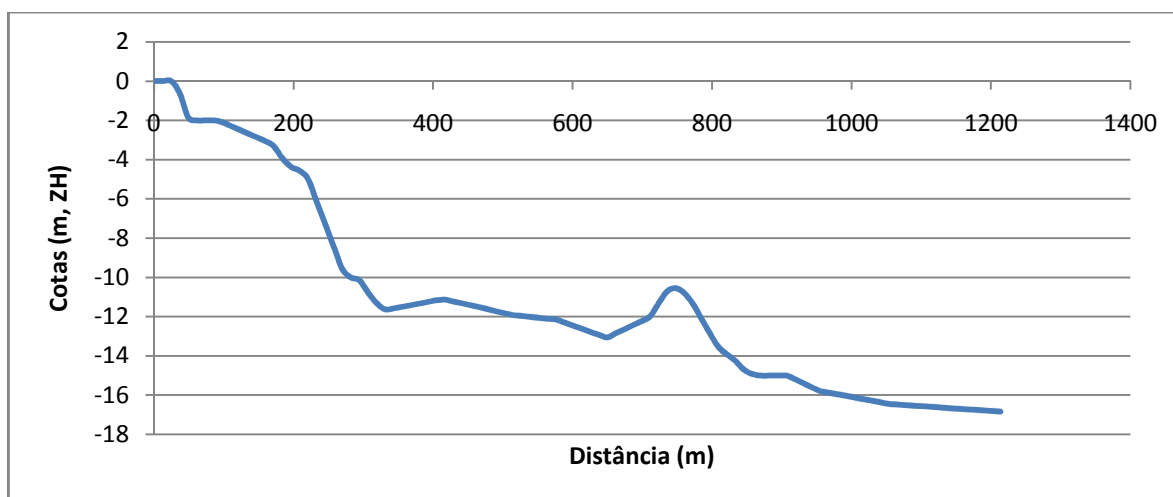
A2.1 – Localização dos perfis na zona em estudo



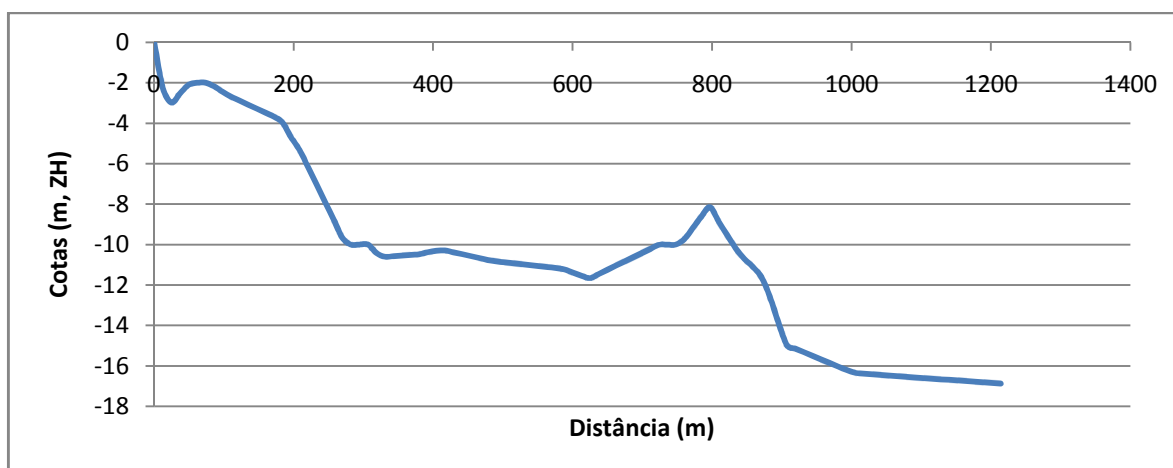
A2.2 – Perfil nº1.



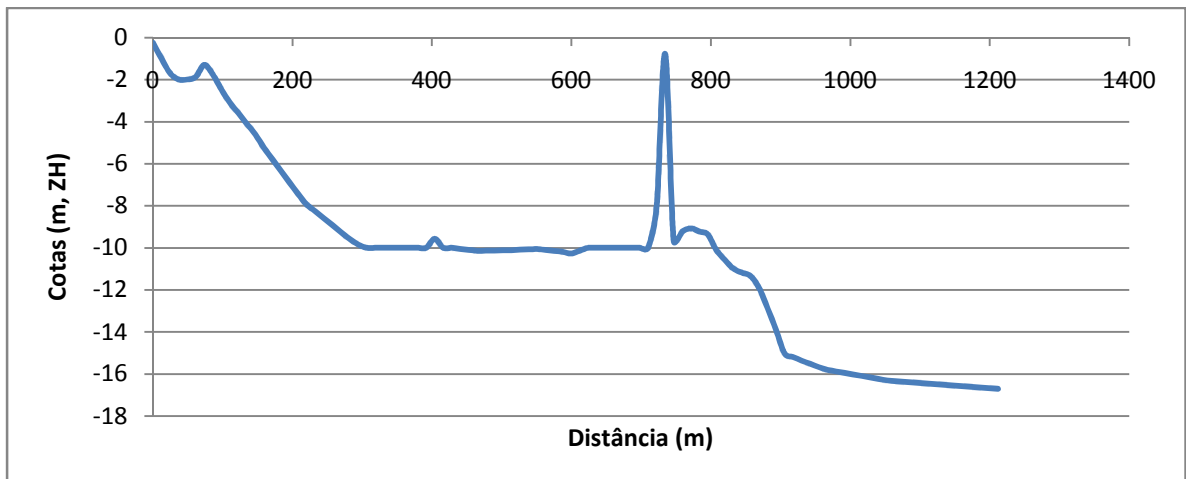
A2.3 – Perfil nº2.



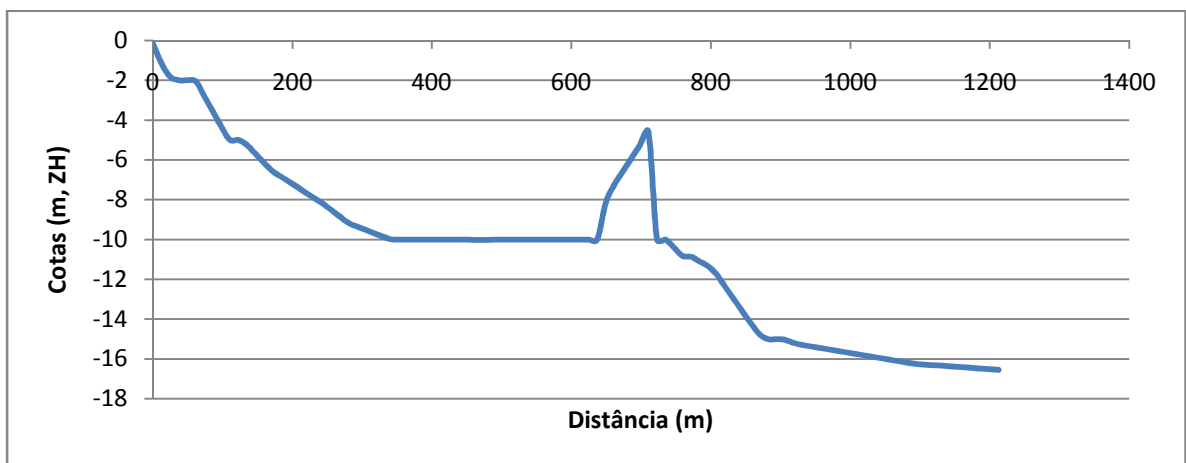
A2.4 – Perfil nº3.



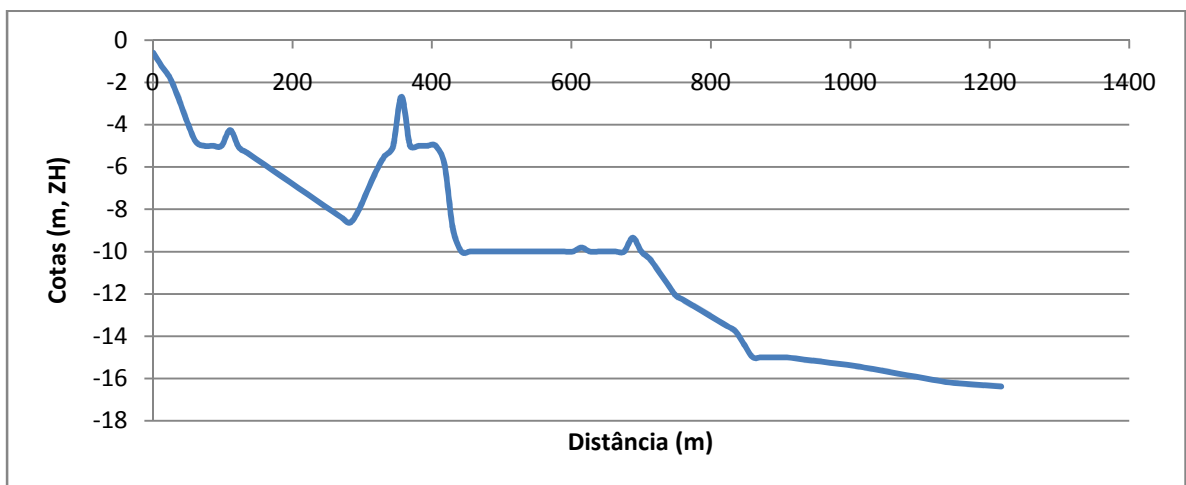
A2.5 – Perfil nº4.



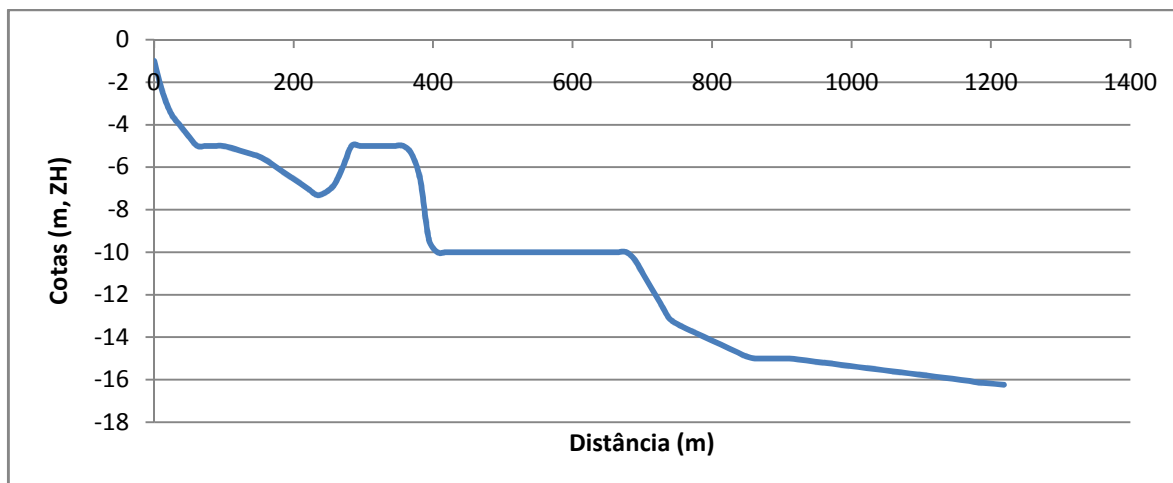
A2.6 – Perfil n°5



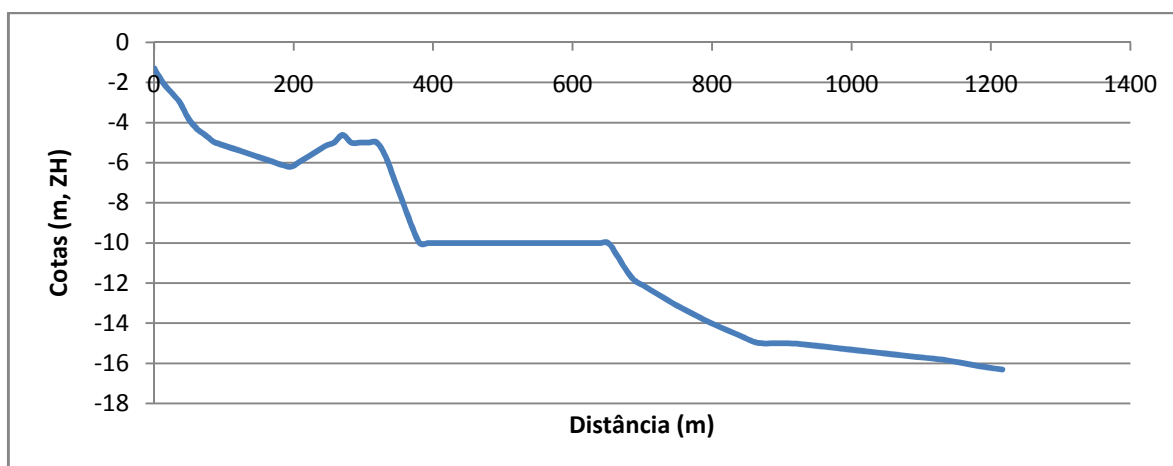
A2.6 – Perfil n°6.



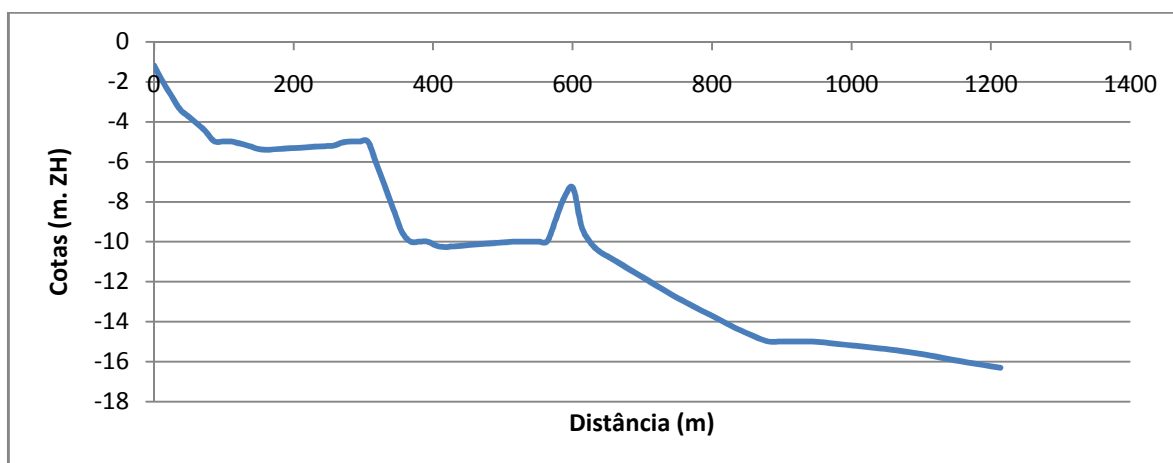
A2.7 – Perfil n°7.



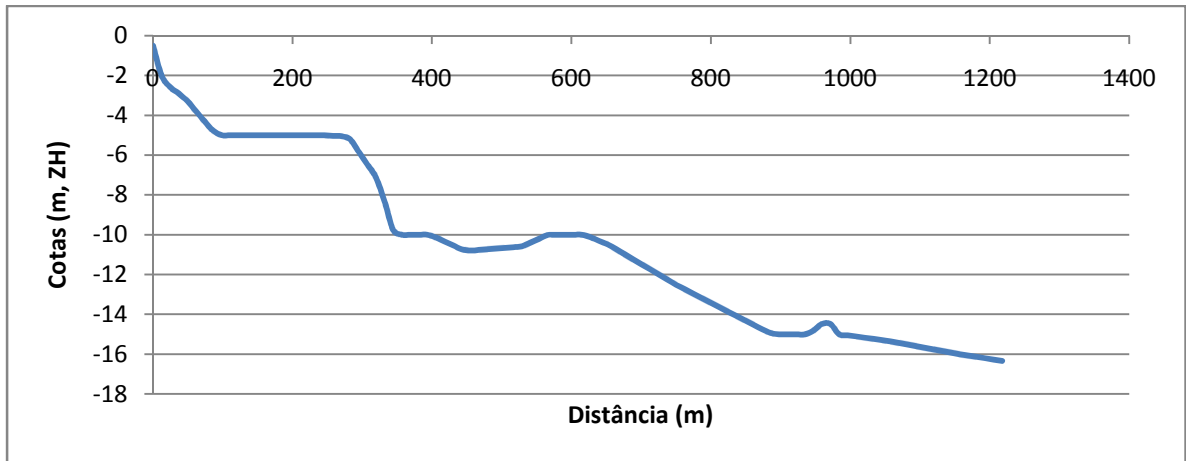
A2.9 – Perfil nº8.



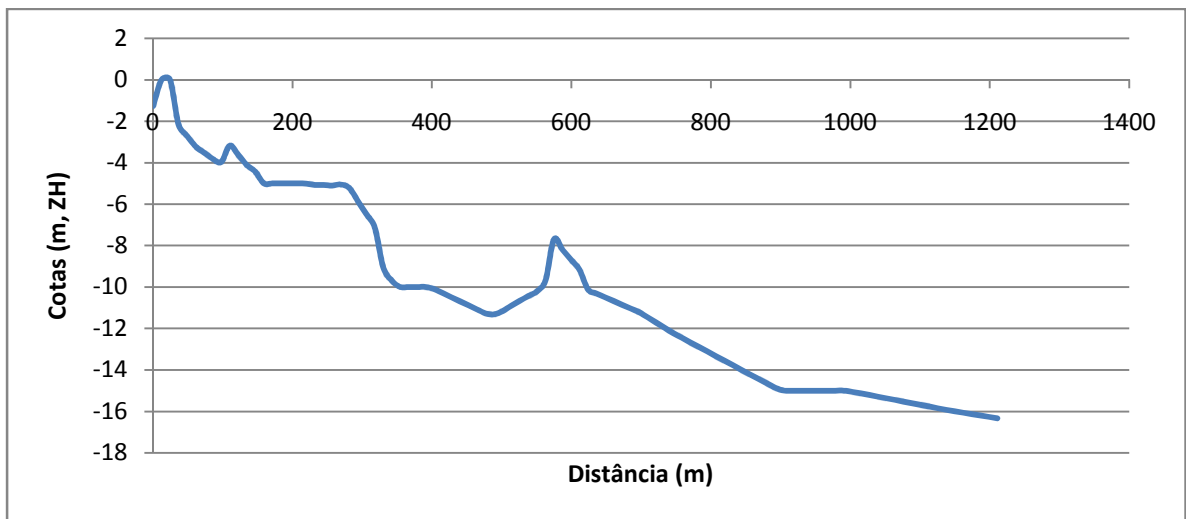
A2.10 – Perfil nº9.



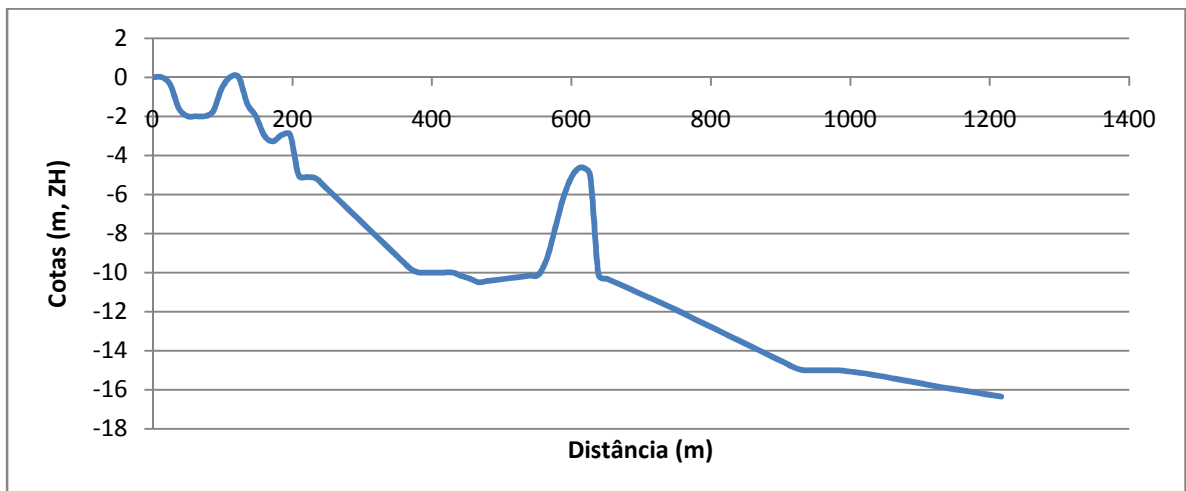
A2.11 – Perfil nº10.



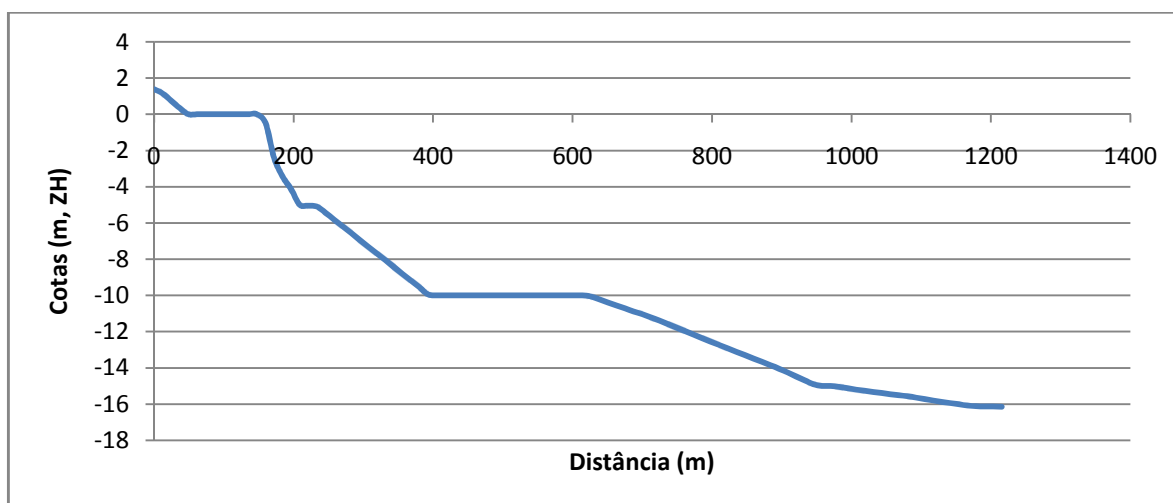
A2.12 – Perfil nº11.



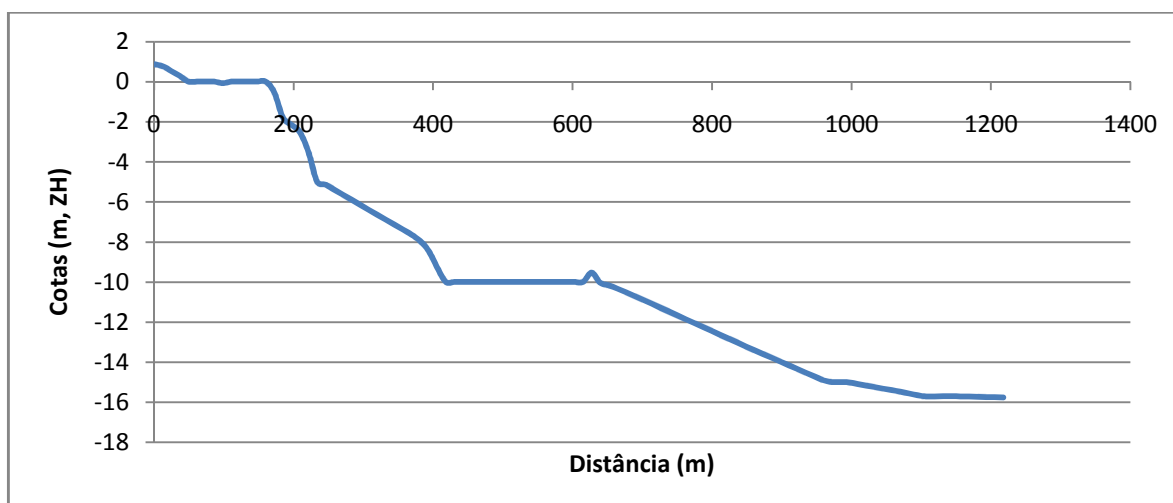
A2.13 – Perfil nº12.



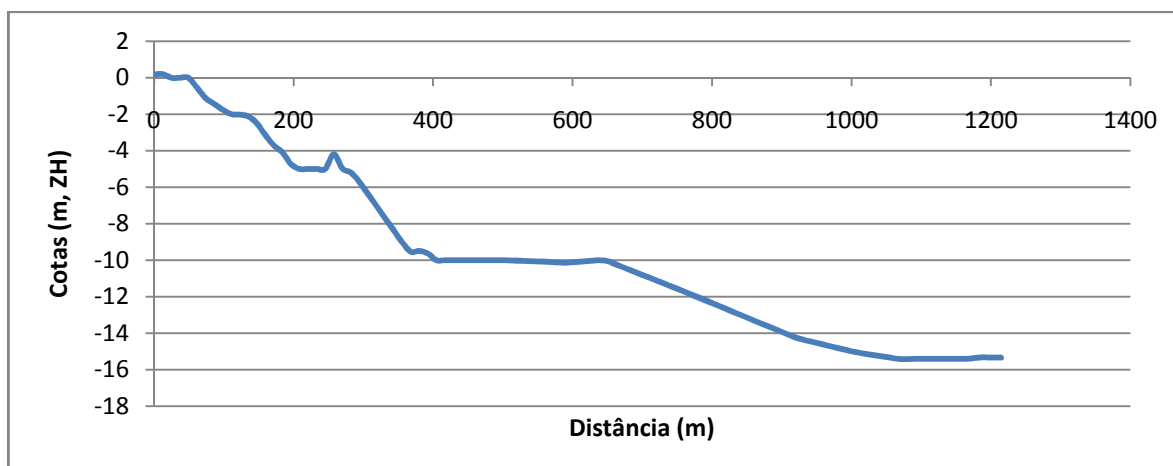
A2.14 – Perfil nº13.



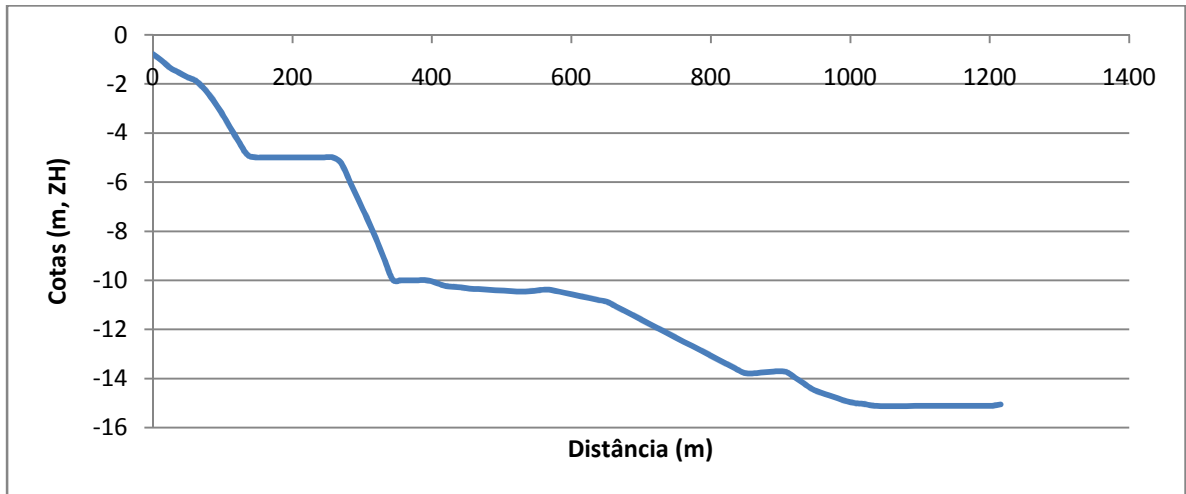
A2.15 – Perfil nº14.



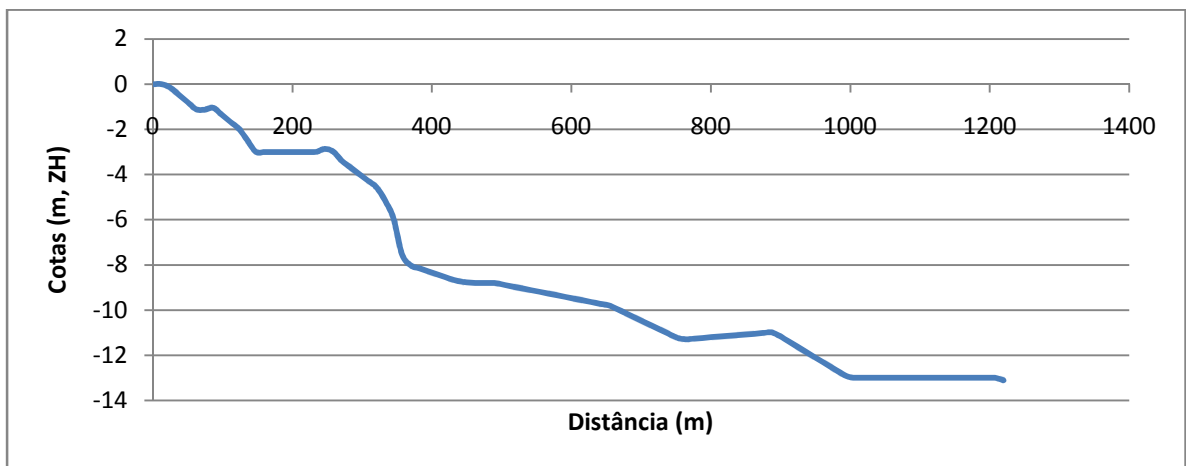
A2.16 – Perfil nº15.



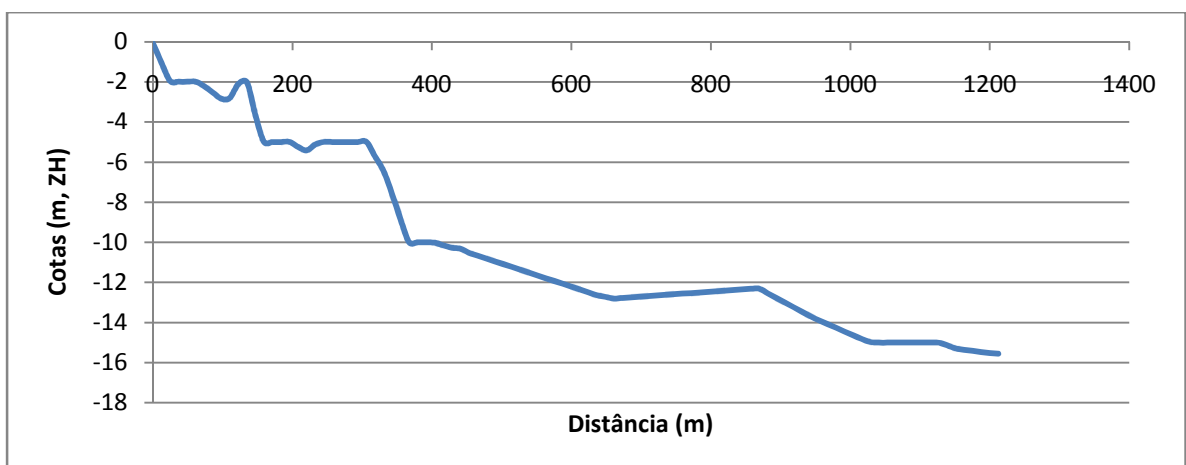
A2.17 – Perfil nº16.



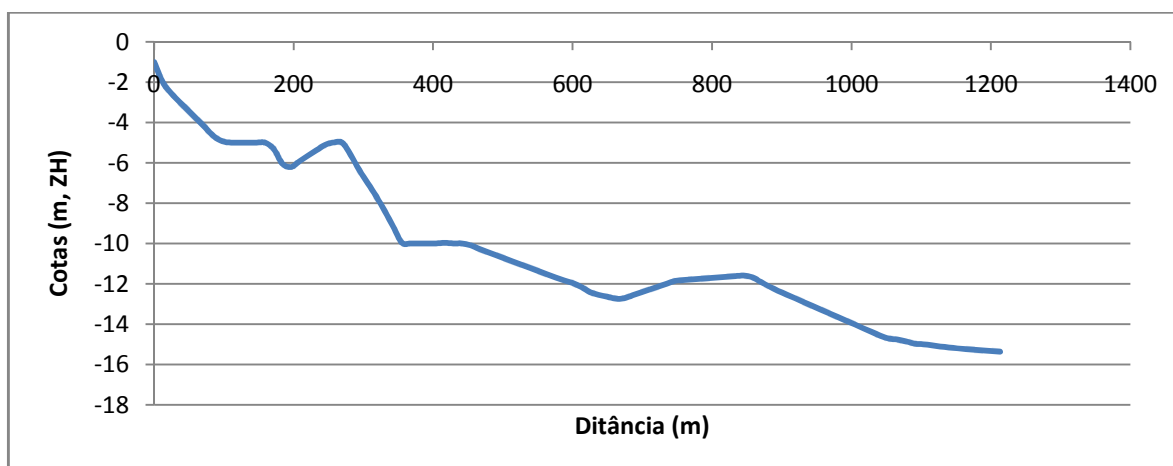
A2.18 – Perfil nº17.



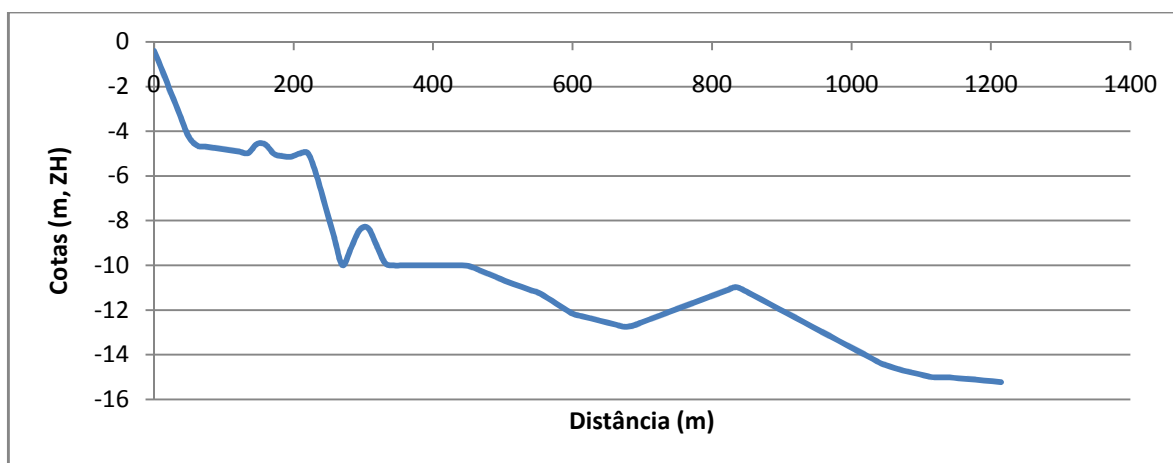
A2.19 – Perfil nº18.



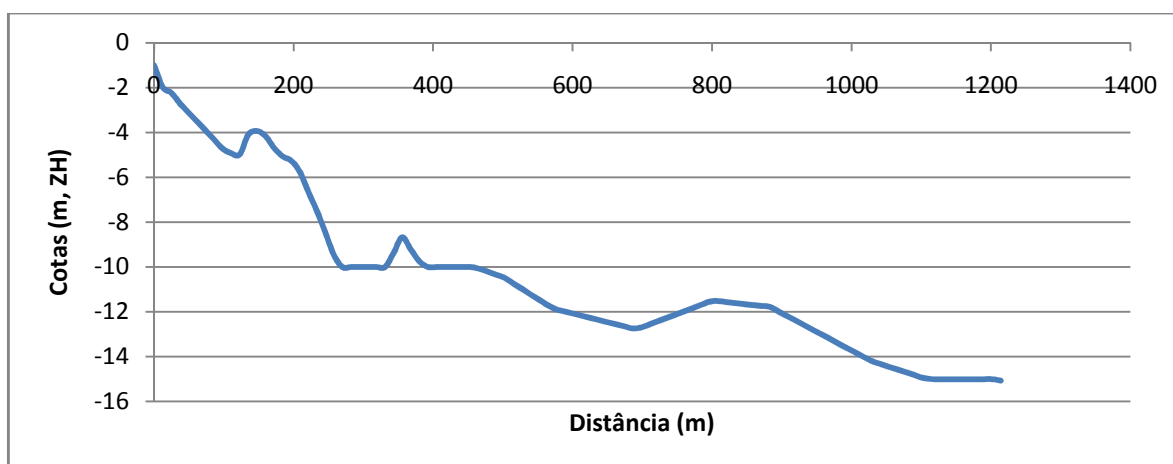
A2.20 – Perfil nº19.



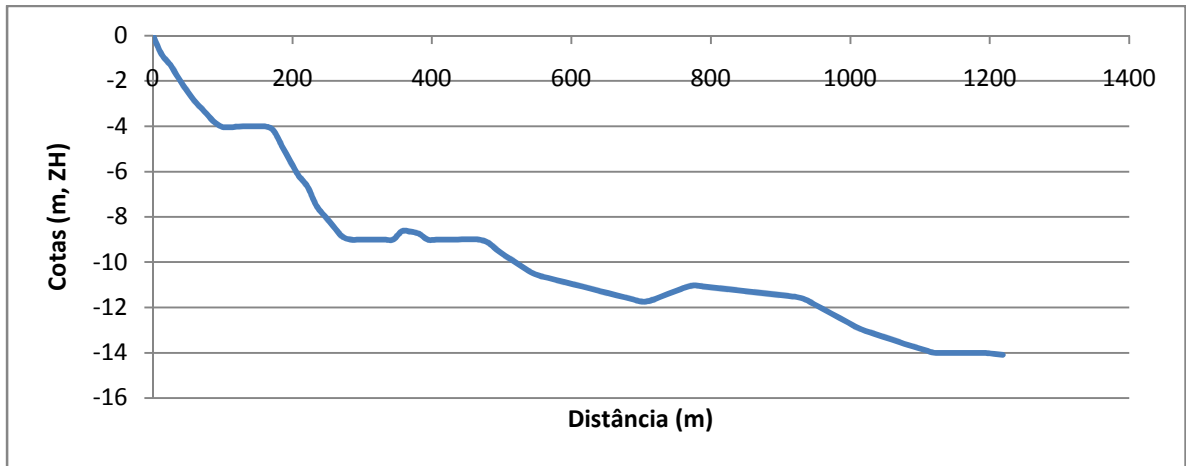
A2.21 – Perfil nº20.



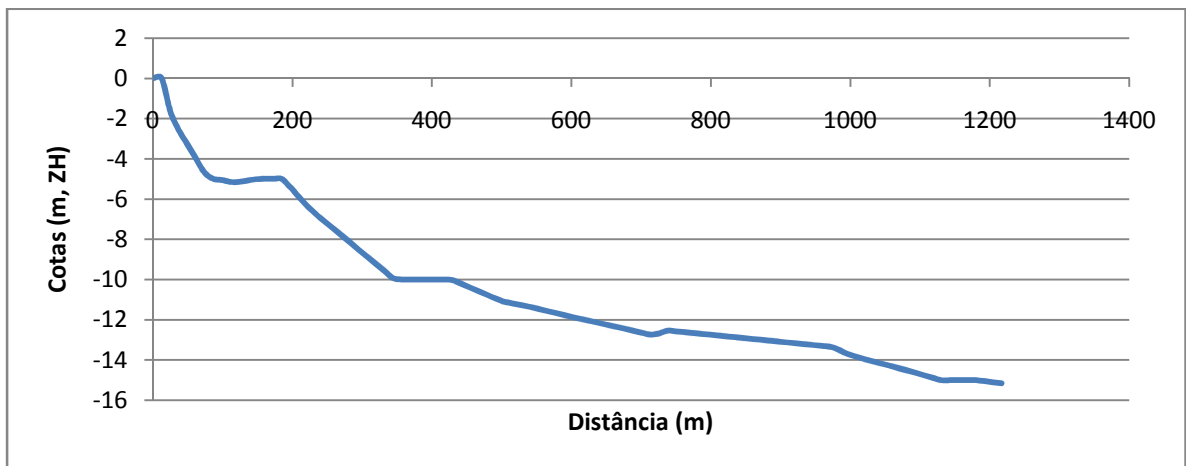
A2.22 – Perfil nº21.



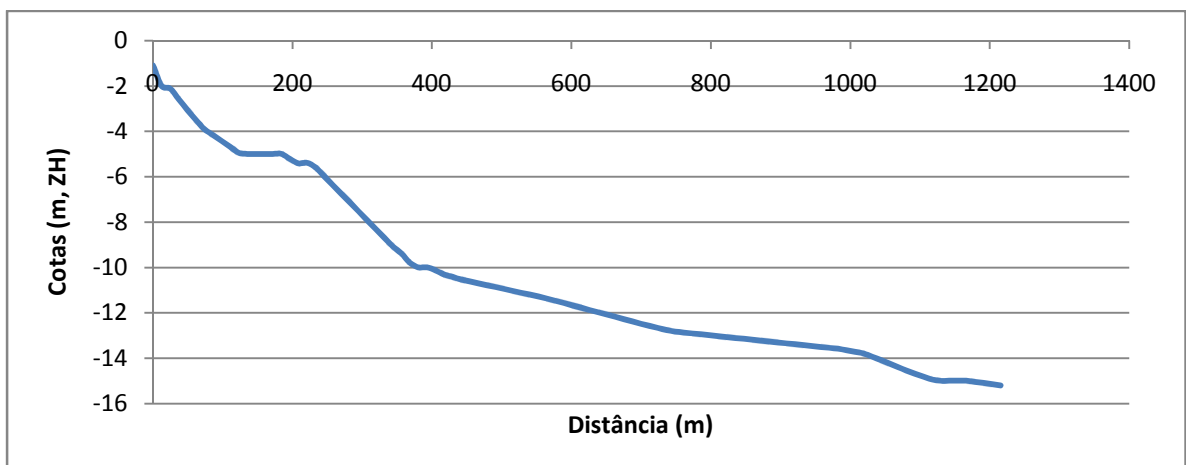
A2.23 – Perfil nº22.



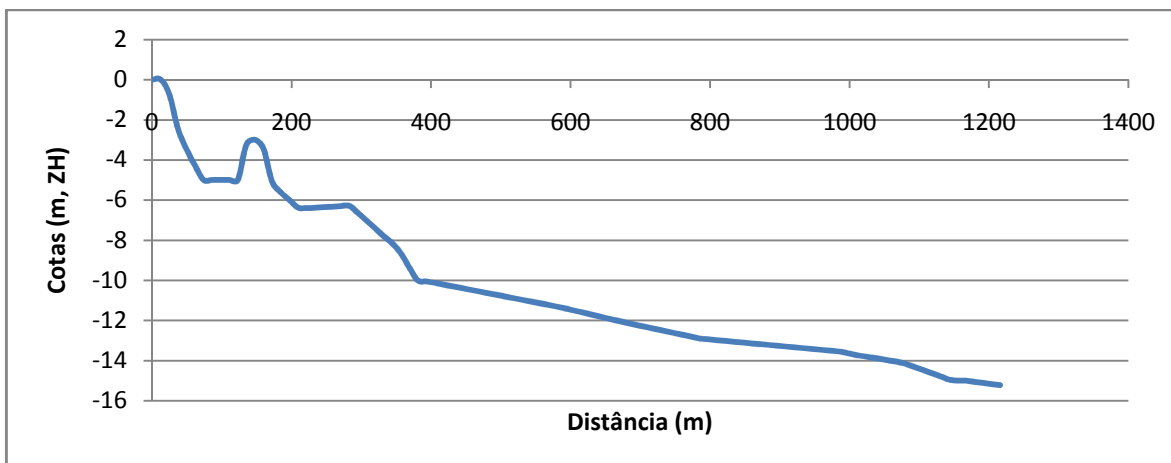
A2.24 – Perfil nº23.



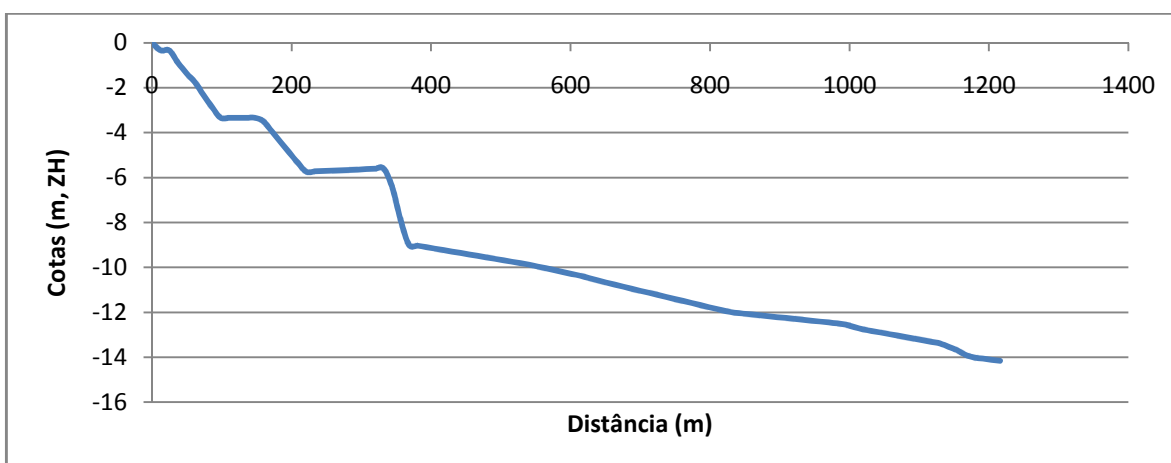
A2.25 – Perfil nº24.



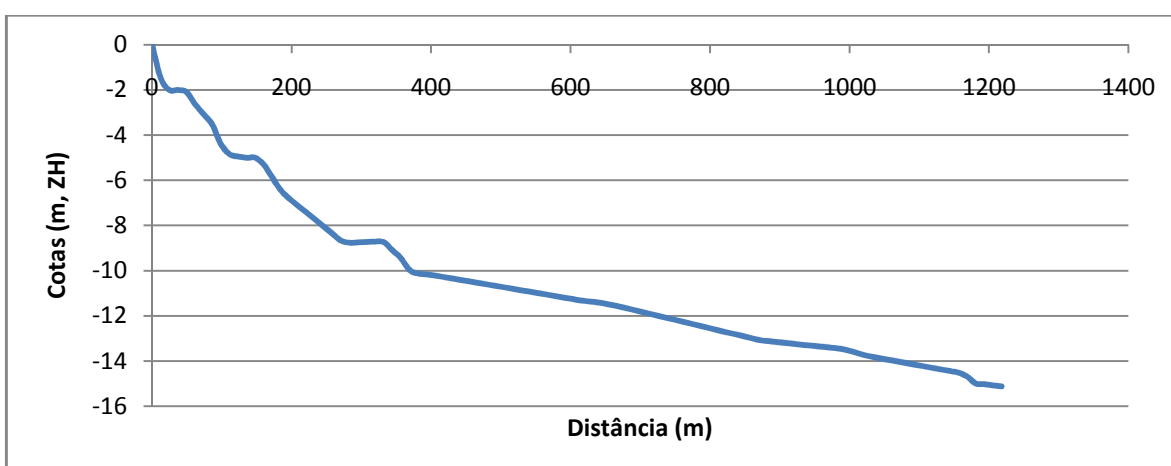
A2.26 – Perfil nº25.



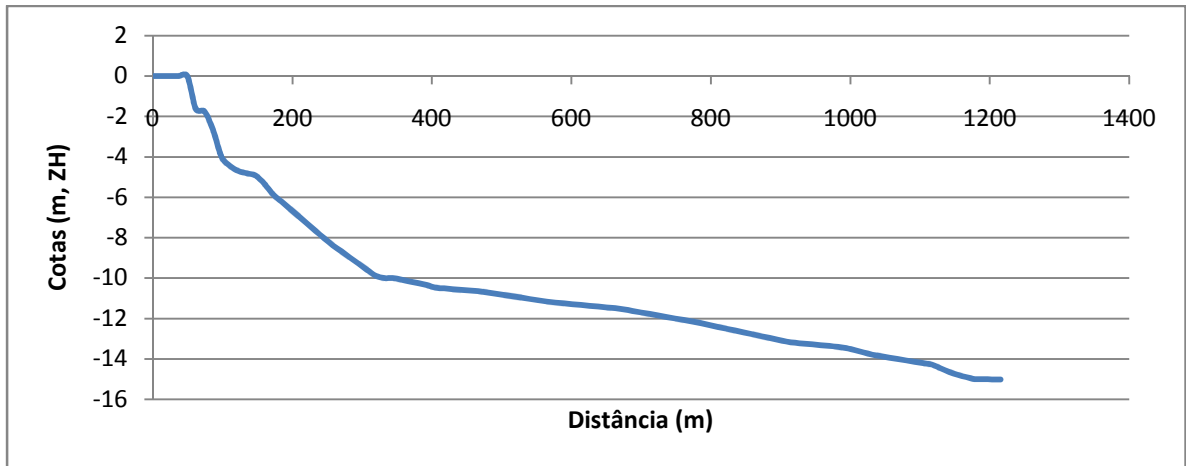
A2.27 – Perfil nº26.



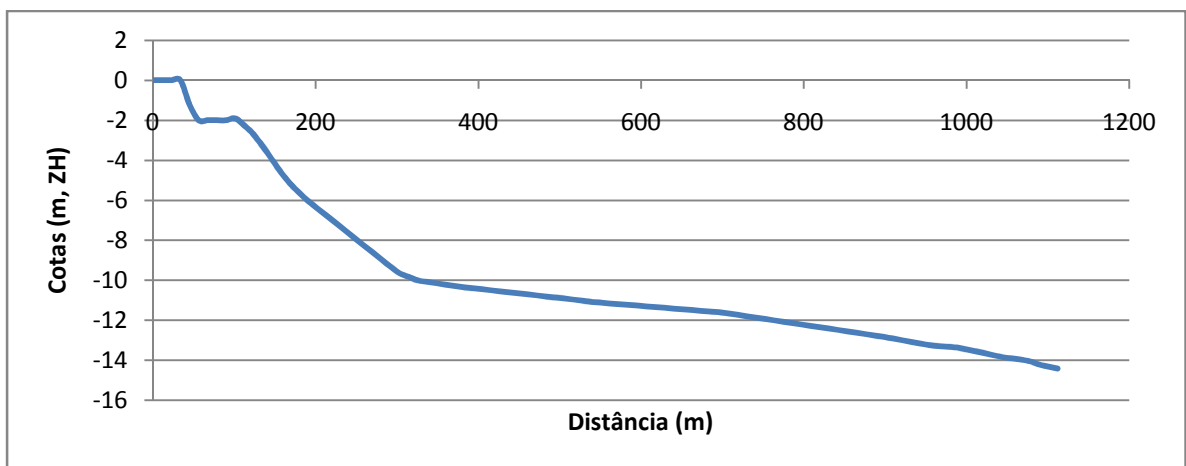
A2.28 – Perfil nº27.



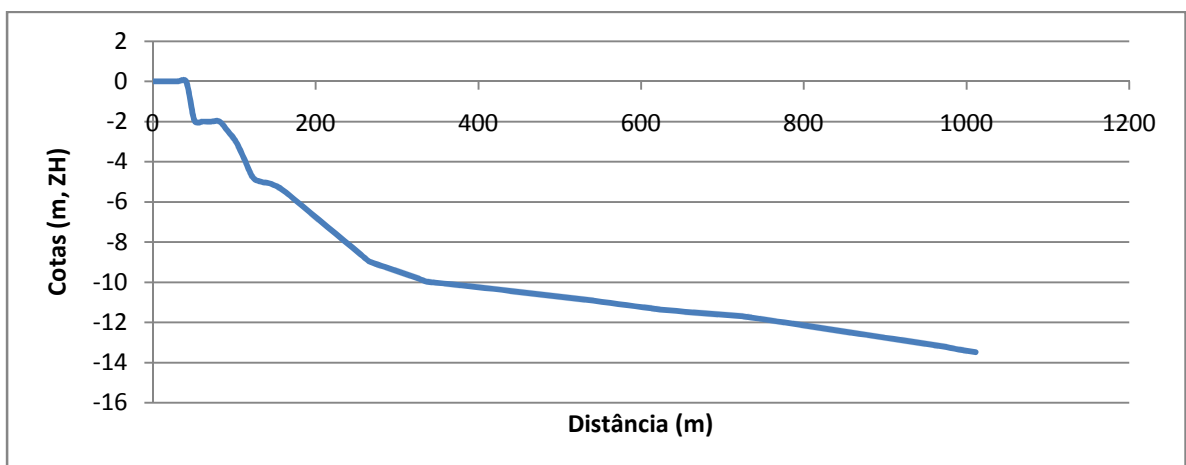
A2.29 – Perfil nº28.



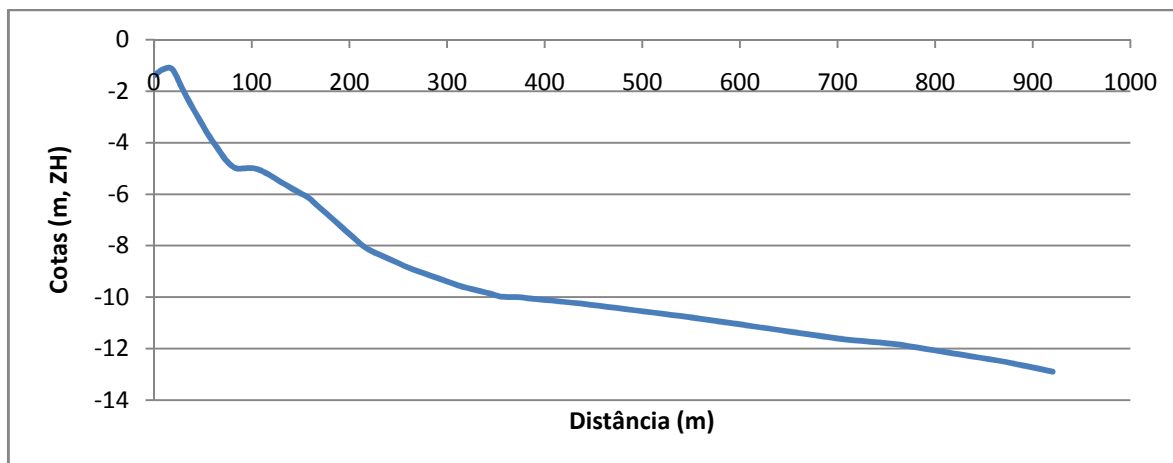
A2.30 – Perfil nº29.



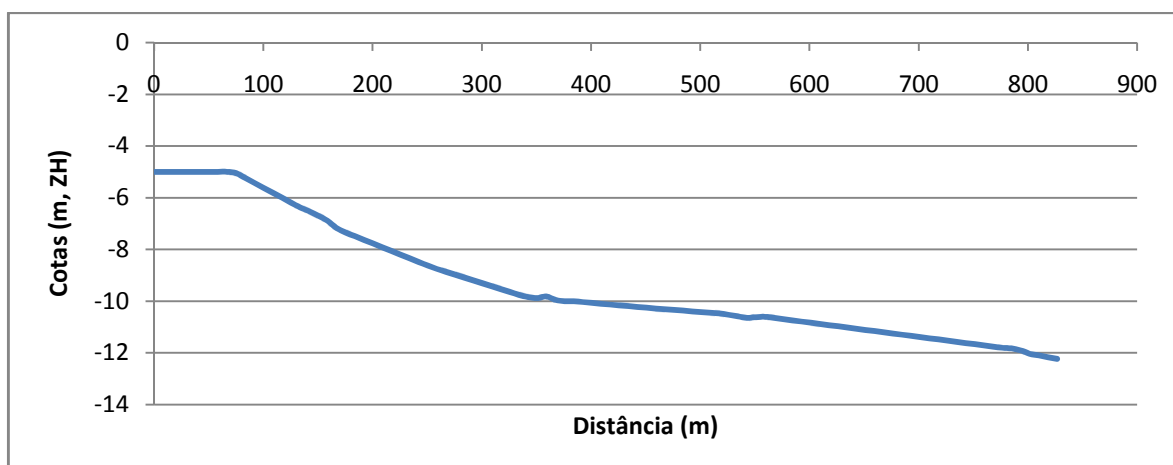
A2.31 – Perfil nº30.



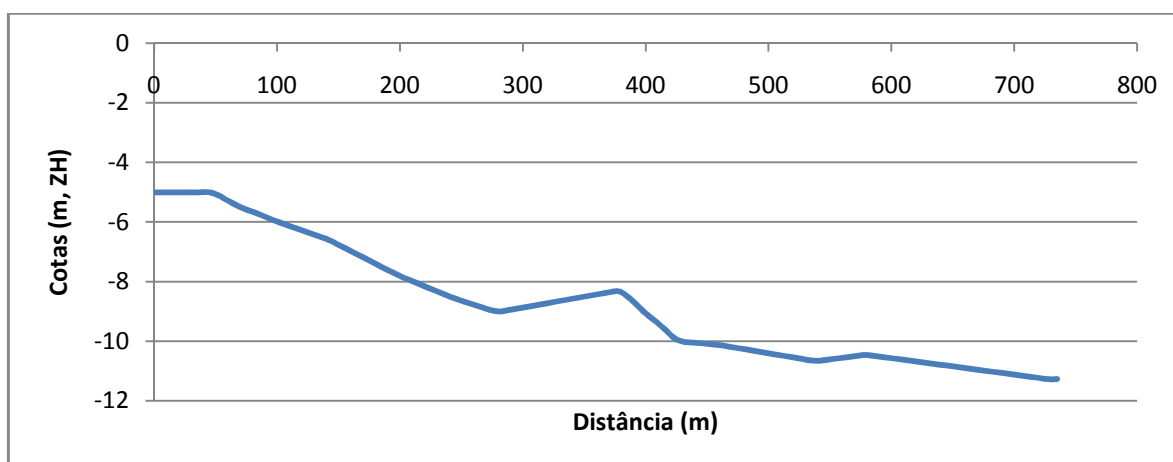
A2.32 – Perfil nº31.



A2.33 – Perfil nº32.



A2.34 – Perfil nº33.



A2.35 – Perfil nº34.

# **A3**

## **FOTOGRAFIAS DA ZONA ESTUDO ENTRE FEVEREIRO E MAIO DE 2009**



A1.1 – Fotografias de 26 Fevereiro de 2009, preia-mar 3,2m.







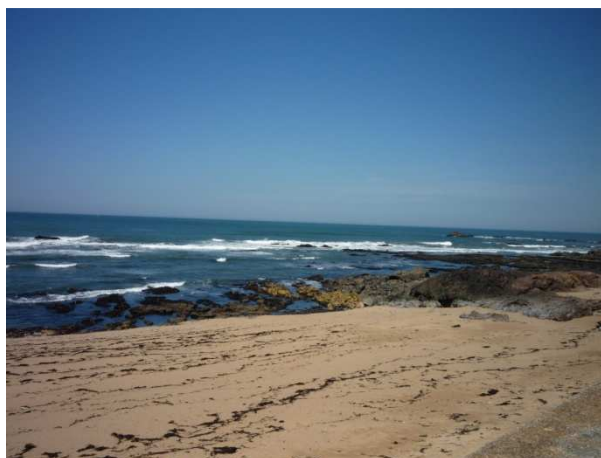
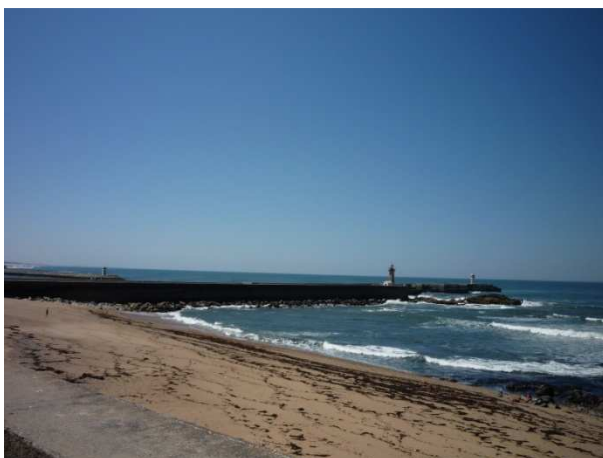
A1.2 – Fotografias de 6 de Março de 2009, preia-mar 2,4m.

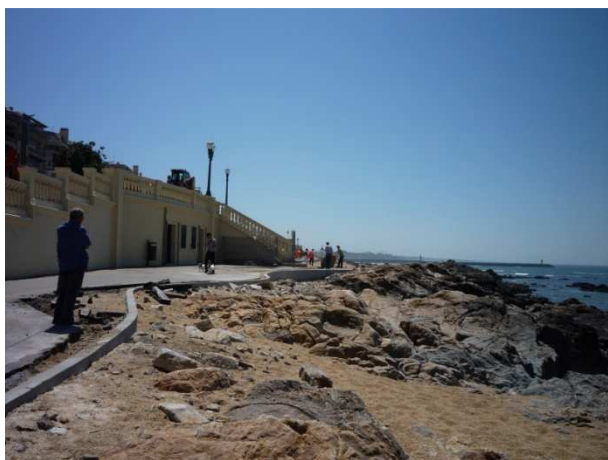
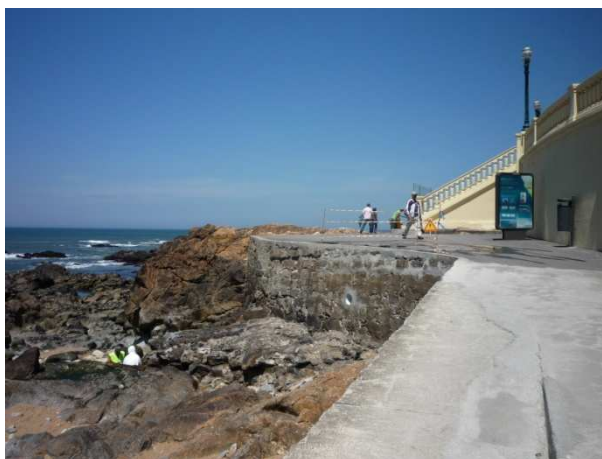






A1.3 - Fotografia de 27 de Maio de 2009, baixa-mar 0,5m.









**A4**

**PERFIL LONGITUDINAL EXEMPLO  
DO QUEBRAMAR**





A4.1 - Perfil longitudinal exemplo do quebramar destacado (H:1/400 V:1/2000)



# A5

## **CÁLCULO DOS NÚMEROS DE ESTABILIDADE $N_s$ , PARA O MÉTODO DE VIDAL *ET AL.***



A5.1 – Dados base para o cálculo de  $F_d$  para a cota +3,5m (ZH)

| Dados base         |      |
|--------------------|------|
| $z_c$ (m)          | 3,5  |
| $R_c$ (m)          | -0,5 |
| $D_{\infty 1}$ (m) | 1,87 |
| $D_{\infty 2}$ (m) | 2,15 |
| $D_{H\infty}$ (m)  | 2,14 |
| $D_{FS2}$ (m)      | 1,50 |

A5.2 – Constantes para o cálculo de  $N_s$ .

|                  | A      | B       | C      |
|------------------|--------|---------|--------|
| Front Slope (FS) | 1,831  | -0,245  | 0,0119 |
| Crest (C)        | 1,652  | 0,0182  | 0,159  |
| Back Slope (BS)  | 2,257  | -0,54   | 0,115  |
| Back Head (BH)   | 1,681  | -0,474  | 0,105  |
| Total Slope (TS) | 1,6018 | -0,2592 | 0,0731 |

A5.3 – Valores de  $N_s$  para cada secção e para cada  $F_d$ , para a cota de +3,5m (ZH)

|               |        | $N_{sFS}$ | $N_{sC}$ | $N_{sBS}$ | $N_{sBH}$ |
|---------------|--------|-----------|----------|-----------|-----------|
| $F_{d\infty}$ | 2,4    | 1,311     | -        | -         | 1,148     |
| $F_{d1}$      | -0,268 | 1,897     | -        | -         | -         |
| $F_{d2}$      | -0,232 | 1,888     | -        | -         | -         |
| $F_{d3}$      | -0,333 | 1,914     | 1,664    | 2,449     | -         |
| $F_{d4}$      | -0,234 | -         | -        | -         | 1,797     |

A5.4 – Dados base para o cálculo de  $F_d$  para a cota +4,0m (ZH)

| Dados base         |      |
|--------------------|------|
| $z_c$ (m)          | 4,0  |
| $R_c$ (m)          | 0    |
| $D_{\infty 1}$ (m) | 1,87 |
| $D_{\infty 2}$ (m) | 2,15 |
| $D_{H\infty}$ (m)  | 2,14 |
| $D_{FS2}$ (m)      | 1,54 |

A5.5 – Constantes para o cálculo de  $N_s$ .

|                  | A      | B       | C      |
|------------------|--------|---------|--------|
| Front Slope (FS) | 1,831  | -0,245  | 0,0119 |
| Crest (C)        | 1,652  | 0,0182  | 0,159  |
| Back Slope (BS)  | 2,257  | -0,54   | 0,115  |
| Back Head (BH)   | 1,681  | -0,474  | 0,105  |
| Total Slope (TS) | 1,6018 | -0,2592 | 0,0731 |

A5.6 – Valores de  $N_s$  para cada secção e para cada  $F_d$ , para a cota de +4,5m (ZH)

|               |     | $N_{sFS}$ | $N_{sC}$ | $N_{sBS}$ | $N_{sBH}$ |
|---------------|-----|-----------|----------|-----------|-----------|
| $F_{d\infty}$ | 2,4 | 1,311544  | -        | -         | 1,1482    |
| $F_{d1}$      | 0   | 1,831     | -        | -         | -         |
| $F_{d2}$      | 0   | 1,831     | -        | -         | -         |
| $F_{d3}$      | 0   | 1,831     | 1,652    | 2,257     | -         |
| $F_{d4}$      | 0   | -         | -        | -         | 1,681     |

**A6**

**PLANTA DA REGIÃO COM OS  
QUEBRAMARES, À ESCALA 1/20000**





A6.1 - Planta da região com os quebramares implantados



# A7

## **RESULTADOS DOS MÉTODOS EMPÍRICOS PARA AS COTAS DE +3,5M (ZH) E DE +4,5M (ZH)**



A7.1 – Resposta da linha de costa, para  $z_c=+3.5\text{m}$  (ZH) e  $X=400\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |         |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |         | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |         | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Ming e Chiew (2000)                           |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Gourlay (1981)                                |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Black e Andrews (2001)                        | X                          |         |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          | X                          | X       |                        |         |

A7.2 – Resposta da linha de costa, para  $z_c=+3.5\text{m}$  (ZH) e  $X=300\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |         |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |         | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |         | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Ming e Chiew (2000)                           |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Gourlay (1981)                                |                            |         | Não Aplicável          |         |
| Black e Andrews (2001)                        | X                          |         |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          | X                          | X       |                        |         |

A7.3 – Resposta da linha de costa, para  $z_c=+4,5\text{m}$  (ZH) e  $X=400\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |               |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |               | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo       | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            | X             | X                      |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |               | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            | X             |                        |         |
| Ming e Chiew (2000)                           | X                          |               |                        |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            | X             |                        |         |
| Gourlay (1981)                                |                            | X             |                        |         |
| Black e Andrews (2001)                        |                            | Não aplicável |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          |                            | Não aplicável |                        |         |

A7.4 – Resposta da linha de costa, para  $z_c=+4,5\text{m}$  (ZH) e  $X=300\text{m}$ .

| Métodos empíricos                             | Resposta da linha de costa |               |                        |         |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|---------|
|                                               | Quebramar singular         |               | Sistema de quebramares |         |
|                                               | Saliência                  | Tômbolo       | Saliência              | Tômbolo |
| Harris e Herbich (1986) e Daily e Pope (1986) |                            | X             |                        |         |
| Pillarczyc (2003)                             | X                          |               | X                      |         |
| Hanson e Krause (1989, 1990)                  |                            | X             |                        |         |
| Ming e Chiew (2000)                           | X                          |               |                        |         |
| Suh e Dalrymple (1987)                        |                            | X             |                        |         |
| Gourlay (1981)                                |                            | X             |                        |         |
| Black e Andrews (2001)                        |                            | Não Aplicável |                        |         |
| Black e Mead (1999) e Andrews (1997)          |                            | Não Aplicável |                        |         |

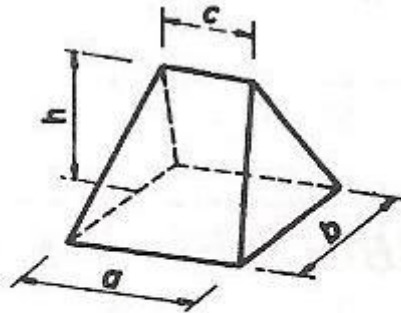
# A8

## CÁLCULO DO VOLUME DE AREIA PARA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL



A8.1 – Parâmetros utilizados para o cálculo do volume de areia.

| Características da saliência  | Y=300    | Y=400 |
|-------------------------------|----------|-------|
| Yoff (m)                      | 161      | 200   |
| $A_{\text{Ming e Chiew}}$ (m) | 56903    | 64960 |
| $2B_1$ (m)                    | 706,8696 | 649,6 |



$$V = \frac{h}{6} (2a + c) b$$

A7.2 – Esquema e fórmula para cálculo do volume de cunha (Correia dos Reis *et al.*, 2007).

A7.3 – Volume de areia parcial e total.

|                                      |   | h    | a     | b     | c    | $V_{\text{parcial}} (\text{m}^3)$ | $V (\text{m}^3)$ |
|--------------------------------------|---|------|-------|-------|------|-----------------------------------|------------------|
| Y=300m                               | 1 | 80,5 | 353,5 | 1,61  | 707  | 30543,57                          | 61087,15         |
|                                      | 2 | 80,5 | 1,61  | 353,5 | 3,22 | 30543,57                          |                  |
| Y=400m                               | 1 | 100  | 325   | 2     | 650  | 43333,33                          | 86666,66         |
|                                      | 2 | 100  | 2     | 325   | 4    | 43333,33                          |                  |
| <b><math>V_{\text{total}}</math></b> |   |      |       |       |      |                                   | <b>147753,82</b> |