

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Erosão Costeira e Produção de Blocos para Obras
de Proteção com Enrocamento**

Bernardo Filipe Costa Guimarães

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Engenharia de Minas e Geoambiente

Orientador: Prof. Alexandre Júlio Machado Leite
Coorientador: Prof. José Cardoso Guedes

Julho de 2012

© Bernardo Guimarães, 2012



EROSÃO COSTEIRA E PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA OBRAS DE PROTEÇÃO COM ENROCAMENTO

BERNARDO FILIPE COSTA GUIMARÃES

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

Coorientador: Professor José Cardoso Guedes

Júri: Professor Doutor José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho

Arguente: Professor Doutor Henrique Botelho de Miranda

Agradecimentos

Á minha família e a todos os meus amigos por todo o apoio, amizade e convívio que contribuíram para o meu bem estar durante a realização desta dissertação. À minha mãe pelo apoio e por estar sempre presente nos momentos chave da minha vida. Ao meu avô Fernando pelos concelhos e por me proporcionar a sua experiência de trabalho permitindo que me formasse enquanto começo a aprender o que é o mundo do trabalho. Ao amigo Nuno Vasconcelos pela disponibilidade e pelas fotografias que foram utilizadas na dissertação. Ao meu orientador, Professor Alexandre Leite do departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por toda a motivação, orientação, bibliografia, troca de ideias e sugestões. Ao meu Coorientador, Professor José Cardoso Guedes do departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela disponibilidade, bibliografia e enquadramento das ideias num mercado de trabalho. Ao Professor Veloso Gomes do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilidade e por toda a bibliografia, esclarecimento de dúvidas e dados fornecidos.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton

Resumo

Esta dissertação aborda a importância dos enrocamentos nas obras de proteção costeira, o modo como é feita a produção de blocos para essas obras e as características gerais de tais blocos.

As obras costeiras têm a função de proteger a costa face ao avanço erosivo do mar por isso começou-se por abordar, no 1º capítulo, a problemática da erosão costeira e os seus principais fatores a ter em conta.

Num 2.º capítulo abordam-se os diferentes tipos de obras de proteção costeira explicando as suas funções e, em particular, a utilização dos enrocamentos nessas obras.

Os enrocamentos utilizados num ambiente marinho têm que ter determinadas características por isso achou-se fundamental referenciar, no 3º capítulo, as propriedades fundamentais dos enrocamentos face ao ambiente fortemente erosivo e dinâmico que irão contactar.

Finalmente, no 4º capítulo, é abordada a produção de enrocamento inserida na perspectiva de atividade de exploração de uma pedreira que poderá ser encarada como unidade de extração de blocos e outros subprodutos resultantes da produção destes.

Abstract

This dissertation discusses the importance of rockfill in coastal protection works, and what characteristics they should have and how their production works.

The coastal works are meant to protect the coast against the advancing erosion of the sea so we started by approach the problematic of coastal erosion and its major factors to consider.

On the 2nd chapter it is approached how coastal protection works explaining their function, the types of existing structures and the use of rockfills in these works.

The rockfill used in a marine environment must have certain characteristics so it was felt essential to refer, in the 3^d chapter to the fundamental properties of rockfill in the highly erosive and dynamic environment that will be in contact.

Finally, in the 4th chapter is approached the production of rockfill in a perspective of a working of a quarry which can be designed to extract rockfill blocks and other sub products resulted by the productions of rockfill.

ÍNDICE

EROSÃO COSTEIRA	1
1.1 A EROSÃO DAS ONDAS.....	3
1.2 A DERIVA LITORAL	9
1.3 AS MARÉS	11
1.4 AS PRAIAS.....	14
1.5 A EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL	18
OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	27
2.1 FUNÇÃO DAS OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	27
2.2 TIPOS DE OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	29
2.3 ESTRUTURA DAS OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	35
2.4 UTILIZAÇÃO DE ENROCAMENTO NAS OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	37
2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE OBRAS COSTEIRAS NA COSTA PORTUGUESA	39
ESCOLHA DE ENROCAMENTO PARA AS OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	44
3.1 PROPRIEDADES DOS ENROCAMENTOS.....	45
3.2 SELEÇÃO DE PEDREIRAS.....	46
3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE ENROCAMENTOS.....	50
PRODUÇÃO DE ENROCAMENTOS.....	53
4.1 PRODUÇÃO DE BLOCOS DE DIMENSÃO/PESO ADEQUADO ÀS OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA	53
4.2 PEGAS DE FOGO ADEQUADAS PARA A PRODUÇÃO DE ENROCAMENTOS	55
4.3 ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO E ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS FRAGMENTOS... ..	61
4.4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE FRAGMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE ENROCAMENTO E PREVISÃO DE SUBPRODUTOS	67
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
5.1 CONCLUSÕES.....	81
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83

Lista de figuras

Figura 1 - Erosão Costeira - Praia da Maceda, Ovar (Nuno Vasconcelos, 2012).	1
Figura 2 - Flutuação do nível médio das águas do mar nos últimos 40000 anos, onde a curva a traço interrompido corresponde a dados mais limitados (Coelho, 2005).	2
Figura 3 - Movimento orbital das ondas em profundidade.....	3
Figura 4 - Criação de uma ondulação originada por uma tempestade.....	4
Figura 5 - Refração das ondas quando se aproximam da linha de costa (Press & Siever, 2001).....	5
Figura 6 - Rebentação mergulhante de uma onda no Taiti quando encontra um recife de coral com baixa profundidade (ASP World Tour, 2012).	6
Figura 7 - Formação de uma onda de rebentação (Press & Siever, 2001).....	7
Figura 8 - Swash e Backwash (Leite, 2010).	7
Figura 9 - Tipos de rebentação	8
Figura 10 - Processos de transporte longitudinal (Coelho, 2005).	10
Figura 11 - Baixa-mar - Praia Boca Mar, Gaia (Nuno Vasconcelos, 2012).	11
Figura 12 - Praia-mar - Praia Boca Mar, Gaia.	12
Figura 13 - Efeito da Lua nas marés diárias (Press & Siever, 2001).	12
Figura 14 - Marés de sizígia (Press & Siever, 2001).	13
Figura 15 - Marés de quadratura (Press & Siever, 2001).	14
Figura 16 - Balanço de areia numa praia por erosão, transporte e sedimentação (Press & Siever, 2001).....	15
Figura 17 - Zonas de rebentação e varrido no perfil de uma praia (Press & Siever, 2001).....	15
Figura 18 - Recuperação das dunas após tempestades (Waikato Regional Council).....	16
Figura 19 - Praia do tipo refletivo (Leite, 2010).....	17
Figura 20 - Praia do tipo dissipativo (Leite, 2010).	18
Figura 21 - Costa de arriba - Praia da Arrifana - Aljezur (Wikipédia, 2012).	19
Figura 22 - Costa de praia - Praia de Cortegaça - Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).	19
Figura 23 - Tipologia da costa portuguesa (INAG, 2005).	20

Figura 24 - Espinho foi umas das zonas da costa portuguesa mais afetada pela erosão (Leite, 2010).	21
Figura 25 - A influencia das barragens na alimentação de sedimentos. A - Fotografia de uma barragem, B- Localizações das barragens mais próximas da foz do rio Douro, C - Areas disponiveis para trasporte de sedimento do continente para o oceano. (Leite, 2010).	22
Figura 26 - Exposição do Litoral da Costa Europeia à erosão (Eurosion, 2004).	22
Figura 27 - Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003) (Coelho, 2005).	23
Figura 28 - Recuo, avanço e vulnerabilidade da linha de costa (Pereira C. A., 2010).	24
Figura 29 - Erosão Costeira - Praia de Cortegaça, Ovar (Nuno Vasconcelos, 2012).	25
Figura 30 - “Carta de Risco” no trecho Barra - Vagueira (Coelho, 2005).	26
Figura 31 - As dunas costeiras estabilizam a linha de costa e constituem uma barreira natural contra as recessas do mar - Praia de Silvade, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).	28
Figura 32 - Paredão de Enrocamento - Praia de Silvade, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).	30
Figura 33 - Esquema de uma obra aderente em betão armado que permite a dissipação da energia das ondas devido a sua parede em forma cilíndrica.	30
Figura 34 - Quebra-mar - Praia da Aguda, Gaia (Google Earth, 2012).	31
Figura 35 - Formação de um tombolo (Associação Portuguesa dos Recursos Hidricos, 2010).	32
Figura 36 - Diferentes formas de esporões (Google Earth, 2012).	33
Figura 37 - Molhes do Douro (Google Earth, 2012).	34
Figura 38 - Estrutura de um recife artificial no Algarve (Unibetão, 2011).	35
Figura 39 - Geometria lateral e de topo de um tetrápode (Silva, Guimarães, & Nunes, 2010).	36
Figura 40 - Reserva de tretapodes na praia de Silvade, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).	36
Figura 41 - Esporão de enrocamento com tetrapodes na zona de impacto - Praia dos Pescadores, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).	37
Figura 42 - Estrutura longitudinal aderente, Mindelo (Gomes F. V., 2011).	37
Figura 43 - Estrutura dos esporões da Praia de Mira (INAG, 2006).	38
Figura 44 - Quebra Mar Destacado - Foz do rio Douro (Irmãos Cavaco, SA).	40
Figura 45- Esporão da Praia da Maceda, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).	41
Figura 46 - Quebra-mar da Aguda em construção (Irmãos Cavaco, SA).	42
Figura 47 - Parte frontal do quebra-mar da Aguda (Nuno Vasconcelos, 2012).	42
Figura 48 - Marginal da Cantareira em construção (Irmãos Cavaco, SA).	43
Figura 49 - Marginal da Cantareira, Foz do Douro (Nuno Vasconcelos, 2012).	43

Figura 50 - Enrocamentos utilizados na margem norte dos molhes da Foz do rio Douro (Nuno Vasconcelos, 2012).	44
Figura 51 - Os enrocamentos dos esporões estão sujeitos ao desgaste das fortes ondulações durante as tempestades de Inverno - Esporão de Cortegaça, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).	45
Figura 52 - Paredão de enrocamento de natureza granítica - Cortegaça, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).	47
Figura 53 - Utilização de enrocamento basáltico num molhe em Vila Franca do Campo - Ilha de S. Miguel, Açores.	49
Figura 54 - Imagem das bancadas de desmorte de uma pedreira - Pedreira da Madalena, Gaia.	49
Figura 55 - Diminuição progressiva da microfissuração com a utilização progressiva de menor carga específica.	50
Figura 56 - Máquina Los Angeles (Engenharia Concursos, 2011)	51
Figura 57 - Desenho de furação e carga de uma pega de fogo a céu aberto (Sociedade Portuguesa de Explosivos, 1994).	56
Figura 58 - Programa de Previsão de Fragmentação - Parâmetros da pega de fogo	68
Figura 59 - Programa de Previsão de Fragmentação - Cálculo do fator rocha com o auxílio da tabela	69
Figura 60 - Programa de Previsão de Fragmentação - Energia do explosivo.....	70
Figura 61 - Características Técnicas do explosivo Riodin (Maxam-Corp, 2009)	71
Figura 62 - Características Técnicas do explosivo Riogel Troner (Maxam-Corp, 2009)	71
Figura 63 - Programa de Previsão de Fragmentação - Calculo do tamanho médio das partículas.....	72
Figura 64 - Programa de Previsão de Fragmentação - Cálculo do índice de uniformidade de Cunningham.....	73
Figura 65 - Programa de Previsão de Fragmentação - Distribuição granulométrica do tamanho das partículas	74
Figura 66 - Programa de Previsão de Fragmentação - Conversão e distribuição da fragmentação de uma pega de fogo em classes de enrocamento.....	75
Figura 67 - Programa de Previsão de Fragmentação - Diminuição da carga específica.....	76
Figura 68 - Resultados da diminuição da carga específica no tamanho dos blocos	77
Figura 69 - Programa de Previsão de Fragmentação - Aumentar o tamponamento.	78
Figura 70 - Resultados do aumento do tamponamento no tamanho dos blocos.	79
Figura 71 - Parque de dunas da Agúda (Leite, 2010).	82

Lista de tabelas

Tabela 1 - Zonas de exposição à erosão de Portugal continental (Eurosion, 2004).	24
Tabela 2 - Taxa média de recuo (m/ano) em Portugal continental (INAG, 2005).	25
Tabela 3 - Quantidade de materiais - Molhes do Douro (Irmãos Cavaco, SA).	39
Tabela 4 - Quantidade de materiais - Esporões Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Irmãos Cavaco, SA).	40
Tabela 5 - Quantidade de materiais - Quebra-mar da Aguda, Gaia (Irmãos Cavaco, SA).	41
Tabela 6 - Quantidade de materiais - Avenida da Foz do Douro (Irmãos Cavaco, SA).	43
Tabela 7 - Empreitada de reparação dos esporões e das obras aderentes da Costa da Caparica e da Cova do Vapor (Instituto da Água, 2004/2005).	52
Tabela 8 - Classificação geomecânica para obtenção do fator da rocha (Morais & Gripp, 2004).	64

Lista de símbolos

V_o	-	Velocidade da onda
L	-	Comprimento de onda
P	-	Período da onda
H	-	Altura da onda
Q_s	-	Caudal volúmico de areia transportada na praia
E	-	Energia da onda na rebentação
C_n	-	Velocidade de grupo das ondas, sendo $n = 1$ em águas rasas.
ρ	-	Densidade da água do mar com valor igual a 1020 kg/ m^3
H_b	-	Altura da onda na rebentação
g	-	Aceleração da gravidade com valor igual a $9,81 \text{ m/s}^2$
α_b	-	Ângulo de incidência da onda na rebentação
EU	-	União Europeia
ANPC	-	Autoridade Nacional de Proteção Civil
DPM	-	Domínio Público Marinho
PDM	-	Plano Diretor Municipal
POOC	-	Plano de Ordenamento da Orla Costeira
REN	-	Reserva Ecológica Nacional
TOT	-	Todo o Tamanho
RPM	-	Rotações por minuto
Tf	-	Tonelada força
kN	-	Quilo-Newton
d	-	Diâmetro do furo
H1	-	Comprimento do furo
Sf	-	Subfuração
α	-	Inclinação do furo
V	-	Afastamento

E -	Espaçamento
H1 -	Carga de um furo
H.C.F -	Comprimento da carga de Fundo
H.C.C -	Comprimento da carga Coluna
T -	Tamponamento
C_e -	Consumo específico
X_{50} -	Tamanho médio de partícula (cm).
FR -	Fator da rocha.
K -	Razão de carga (kg/m^3).
Q_e -	Massa do explosivo utilizado (kg).
E_r -	Representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (ANFO=100).
X -	Tamanho da malha da peneira.
n -	Índice de uniformidade.
P -	Percentual de material passante na peneira de tamanho X.
W -	Desvio da perfuração (m).
L -	Comprimento total de carga (m).
H -	Altura do banco (m).
abs -	Valor absoluto referente a (BCL-CCL)/L.
Er -	Energia relativa por massa efetiva do explosivo.
VOD_e -	Velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo).
VOD_n -	Velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s).
RWS -	Representa a energia relativa por massa comparada ao ANFO.
RMD -	Maciço Rochoso
JF -	Maciço Fraturado
RDI -	Influência da densidade
HF -	Módulo de Young ou Resistência à compressão uniaxial

Capítulo 1

Erosão Costeira

A erosão costeira dá-se quando o mar avança sobre a terra, provocando a erosão e recuo das zonas litorais que perdem terreno face ao mar [figura 1].



Figura 1 - Erosão Costeira - Praia da Maceda, Ovar (Nuno Vasconcelos, 2012).

Este fenómeno afeta grande parte do nosso planeta e é causado tanto por razões naturais como por razões humanas. A força das ondas, a subida do nível médio do mar, a deriva litoral (devido a correntes junto à costa), o vento, as tempestades, o movimento de marés são exemplos de fenómenos naturais que contribuem para a erosão costeira. Mas não é só devido aos fenómenos naturais que a erosão acontece, a intervenção humana também é responsável pela erosão costeira. Obras como construções de portos, barragens e a consequente retenção de areias nas albufeiras, construções em zonas dunares (destruição de proteções costeiras naturais), dragagens e exploração de inertes podem contribuir de uma forma direta para a erosão costeira. A poluição atmosférica pode ser considerada uma contribuição indireta para erosão costeira visto que os gases de estufa contribuem para o aquecimento do planeta, o que por sua vez vai ser responsável pelo derretimento do gelo dos calotes polares; este fenómeno vai originar a subida do nível médio da água dos oceanos para além das naturais variações provocadas pelos períodos de glaciações [figura 2].

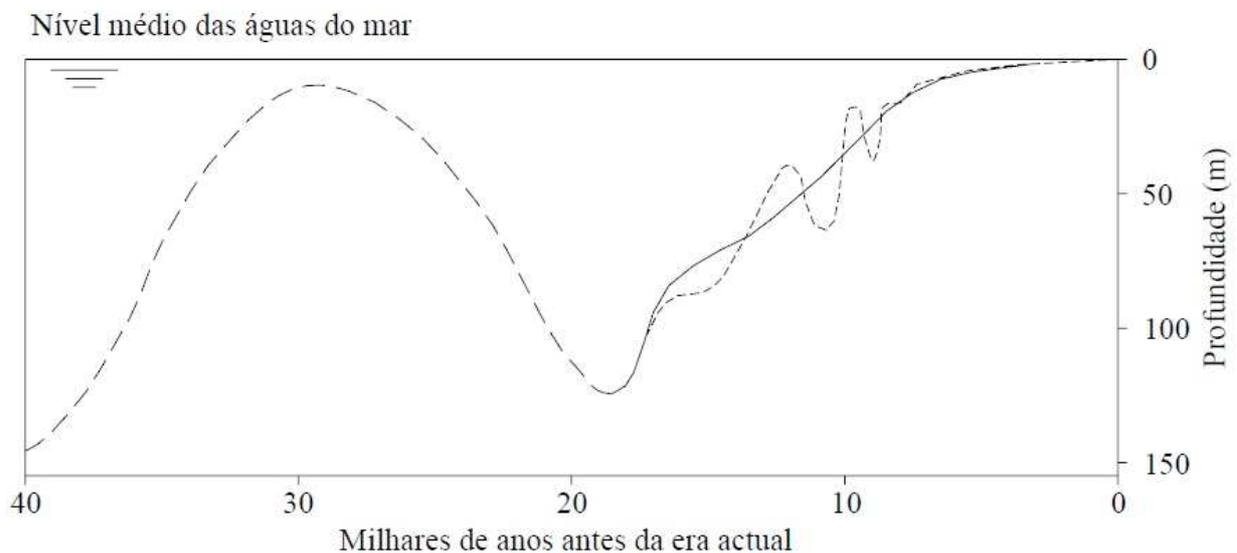


Figura 2 - Flutuação do nível médio das águas do mar nos últimos 40000 anos, onde a curva a traço interrompido corresponde a dados mais limitados (Coelho, 2005).

1.1 A Erosão das Ondas

Quando o vento sopra sobre a superfície do mar, em águas profundas provoca um movimento orbital nas partículas da água. Uma onda é produzida devido ao facto das partículas adjacentes estarem em diferentes estágios no seu curso circular. Essa onda vai deslocar-se rapidamente na direção em que o vento está a soprar. Esse tipo de ondas é designado por ondas oscilatórias [figura 3]. Os três fatores principais que contribuem para o tamanho e força das ondas formadas em profundidade são a intensidade do vento, a distância viajada pela superfície da água e a duração do vento, podendo ser medidas pelo seu período, comprimento de onda, altura e velocidade. O período de uma onda é o tempo necessário para duas cristas de ondas consecutivas passarem em um dado ponto, o comprimento de onda é a distância horizontal entre duas cristas, a altura da onda é a distância vertical entre a crista e o cavado da mesma e a velocidade das ondas é a velocidade pela qual uma série de ondas avança.

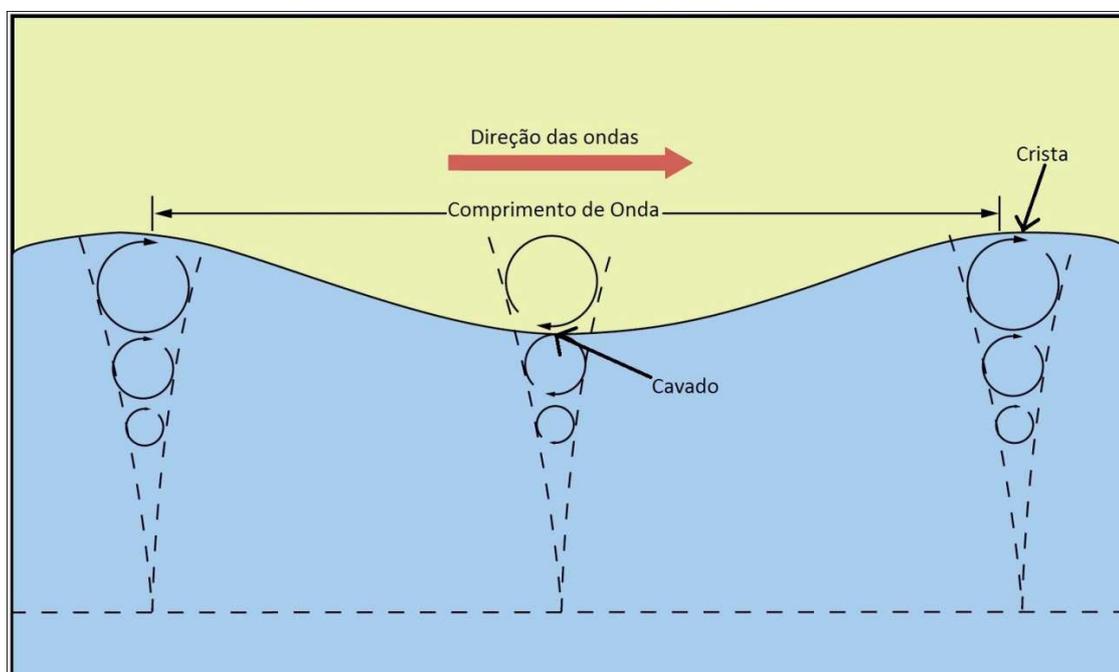


Figura 3 - Movimento orbital das ondas em profundidade

A velocidade com que uma onda se move para a frente pode ser medida pela seguinte equação básica, em que V_o é a velocidade da onda, L é o comprimento de onda e T o período da onda.

$$V_o = L/T \quad (1)$$

As tempestades criam ondas grandes e irregulares que, ao afastarem-se do centro da tempestade, em círculos cada vez maiores, ficam progressivamente mais regulares, resultando em ondas mais baixas, largas e arredondadas [figura 4]. Dá-se assim a criação da **ondulação**, designada usualmente pela palavra inglesa *swell*.

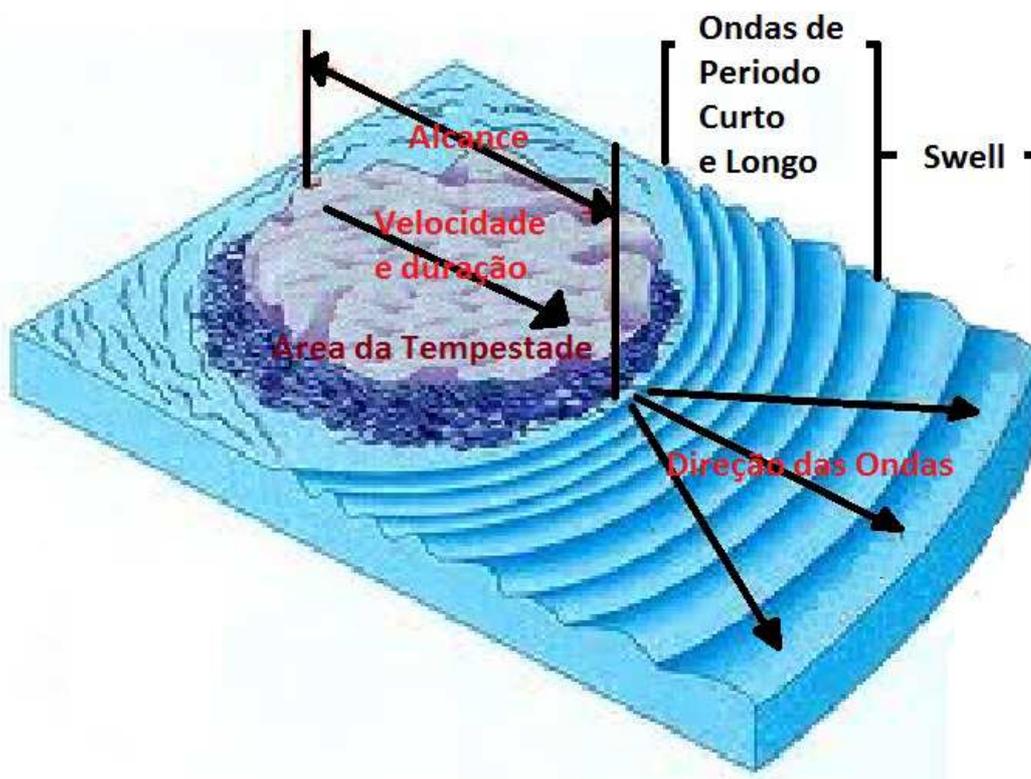


Figura 4 - Criação de uma ondulação originada por uma tempestade

As linhas da ondulação quando, se encontram longe da costa, seguem paralelas umas as outras, frequentemente com um ângulo em relação à linha de costa. À medida que as ondas se aproximam da costa e de um fundo menos profundo, as linhas de ondas tendem a tornar-se gradualmente mais paralelas a linha de costa [figura 5]. O fenômeno da inclinação das linhas de ondas para

uma posição mais paralela a linha de costa designa-se por **refração das ondas**. A refração começa à medida que as ondas se aproximam da costa com um determinado ângulo. A zona da onda que está mais perto da costa encontra um fundo menos profundo e as orbitas das partículas de água tornam-se mais elípticas; nessa zona, a onda abranda. As outras zonas da onda, à medida que atingem esse fundo menos profundo, tornam-se igualmente mais lentas devido à maior força de atrito exercida pelo fundo. Este fenômeno vai fazer com que as ondas fiquem cada vez mais paralelas à linha de costa.

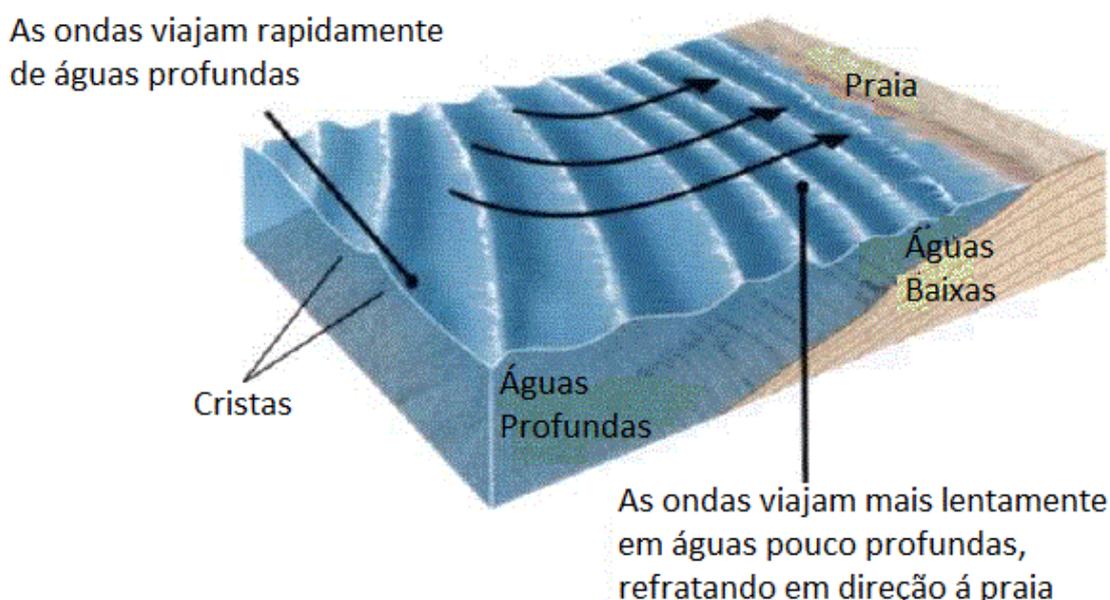


Figura 5 - Refração das ondas quando se aproximam da linha de costa
(Press & Siever, 2001).

A ondulação, à medida que se aproxima da linha de costa, vai ganhar uma maior componente vertical tornando-se maior, e as ondas assumem uma forma de crista. Este fenômeno acontece quando a profundidade é inferior a $1/20$ do comprimento de onda, começando as ondas a comportar-se como ondas de pequena profundidade. Estas ondas vão quebrar quando se aproximarem suficientemente da costa. Geralmente uma onda quebrará quando a profundidade é perto de 1.3 vezes a altura da onda (H) [figura 6]. Quando o ângulo da crista da onda alcança 120° e o comprimento da onda

excede sete vezes a altura, a configuração da onda torna-se instável e ela quebra-se. Isto pode acontecer mesmo em águas profundas.

$$H/L = 1/7 \quad (2) \Rightarrow \text{A onda quebra} \leq \text{Prof}/H \approx 1,3 \quad (3)$$



Figura 6 - Rebentação mergulhante de uma onda no Taiti quando encontra um recife de coral com baixa profundidade (ASP World Tour, 2012).

A zona onde as ondas quebram designa-se por **zona de rebentação** (*surf zone*), onde se dá a passagem da ondulação (*swell*) para as ondas de rebentação (*breakers*), zona onde as ondas atingem a costa com um forte poder erosivo, transportando areia, desgastando as rochas e destruindo estruturas construídas perto da linha de costa [figura 7].

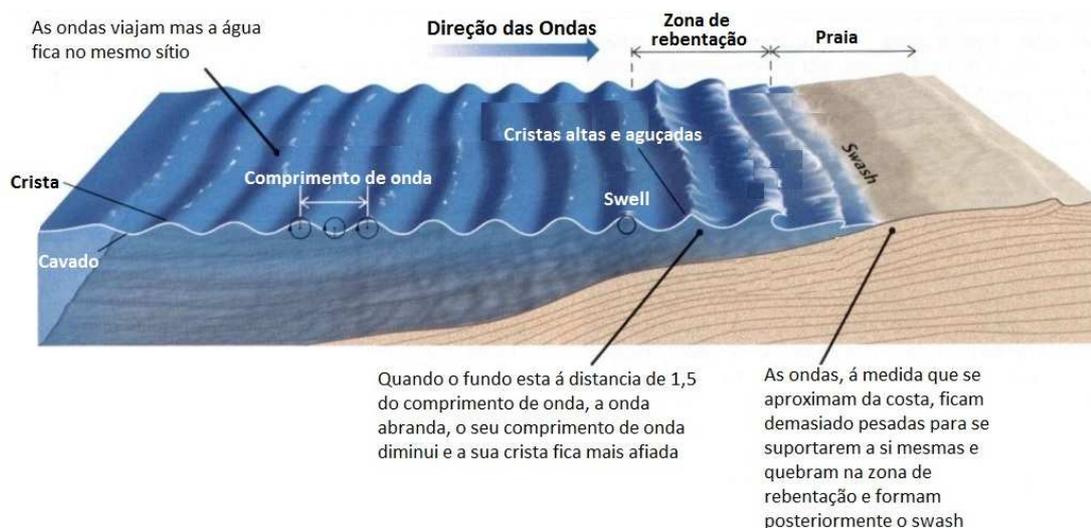


Figura 7 - Formação de uma onda de rebentação (Press & Siever, 2001).

Depois da rebentação, as ondas com menor altura e energia, continuam em movimento rebentando novamente na costa, dirigindo-se para a zona inclinada da praia e formando uma erupção de água que transporta areia ou mesmo pedras se a onda tiver força suficiente, segundo a direção e o sentido de progressão da onda. Este fenômeno é designado por *swash*. Quando a água corre para trás através da descida do declive (em direção do mar), origina o fenômeno chamado de *backwash*, fenômeno este que transporta as partículas em direção ao mar num movimento praticamente perpendicular à linha de costa [figura 8].

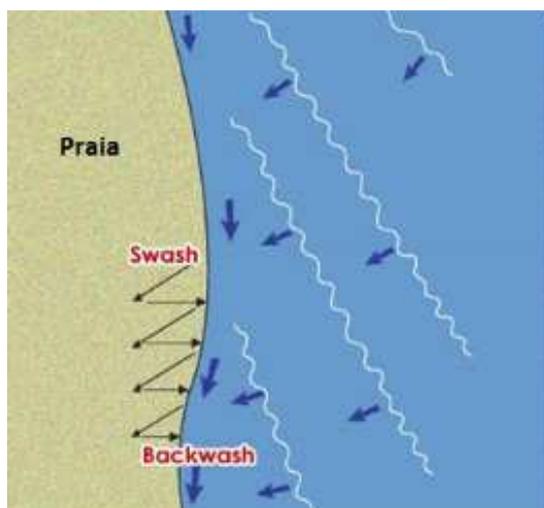


Figura 8 - Swash e Backwash (Leite, 2010).

As ondas, ao chegarem à zona de rebentação, podem quebrar de diferentes maneiras, dependendo do tipo de praia/fundo que vão encontrar e da intensidade e direção do vento que na altura está a soprar na costa. Existem três tipos de rebentação; a rebentação de tipo **mergulhante**, a de tipo **deslizante** e a de tipo **ascendente** [figura 9].

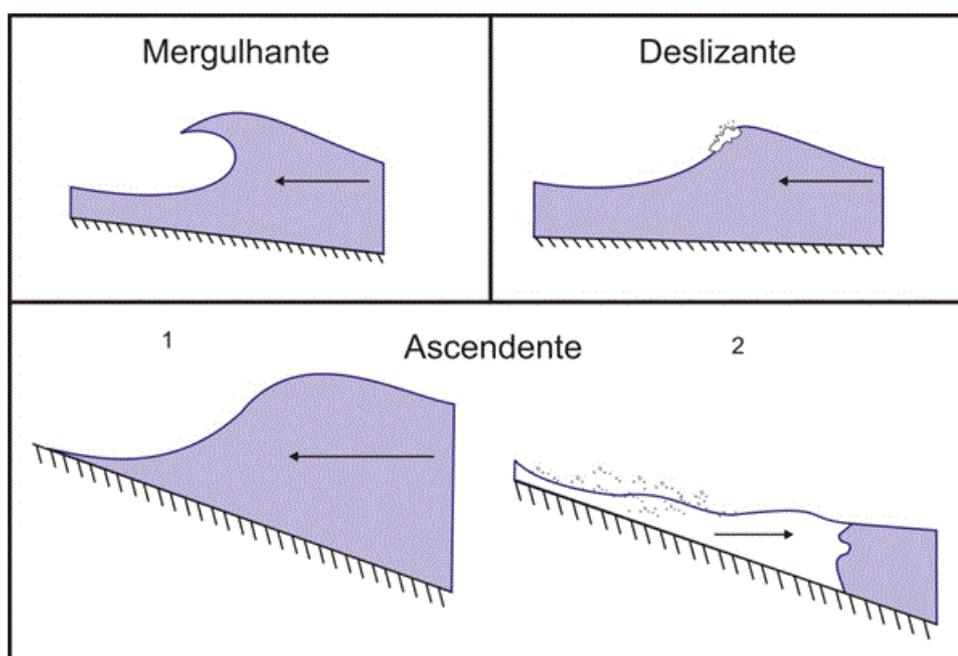


Figura 9 - Tipos de rebentação

A rebentação mergulhante tem uma forma tubular e quebra de uma forma muito poderosa e violenta, em que a crista cai para frente da onda, formando um tubo. Este tipo de rebentação tem um forte poder erosivo na zona de impacto. Geralmente a onda de rebentação de tipo deslizante começa a quebrar relativamente longe da praia, de um modo mais suave, espalhando-se pela água, formando um rasto de espuma. Esta rebentação é típica de praias rasas e pouco inclinadas. Na rebentação ascendente a onda não chega a quebrar propriamente, ascendendo sobre o declive da praia e interagindo com o refluxo das ondas anteriores. Estas ondas ocorrem em praias muito inclinadas, que não permitem que a onda consiga quebrar. O tipo de rebentação das ondas é também fortemente afetado pelo fator vento. Se, por

exemplo, o vento for terral (*vento offshore*), direcionado da terra para o mar, favorece o tipo de rebentação mergulhante enquanto que o vento direcionado do mar para a terra, vento maral (*onshore*), favorece o tipo de rebentação deslizante. Num dia em que haja alteração de direções e/ou intensidades de ventos, é possível observar em certas praias a alteração do tipo de rebentação influenciado pelo vento.

A taxa a que a erosão costeira ocorre é influenciada não só pela sua exposição às ondas, mas também pela própria natureza da costa. A erosão é mais rápida nas zonas em que o mar ataca sedimentos mais moles e pouco consolidados.

1.2 A Deriva Litoral

A deriva litoral consiste no transporte de sedimentos ao longo da costa. Os sedimentos transportados são maioritariamente areias, mas também podem ser transportados sedimentos maiores, como pedras. O transporte de sedimentos é originado por ondulação oblíqua à linha de costa provocando uma corrente de deriva litoral que pode variar consoante a energia das ondas e os fundos da costa local. Essa corrente de deriva litoral, juntamente com as ondas, tem a capacidade de transportar grandes quantidades de sedimentos, por ação de dois mecanismos: o arrastamento pelas correntes na zona próxima da praia e o transporte na zona de rebentação das ondas, como se pode observar na figura seguinte [figura 10]:

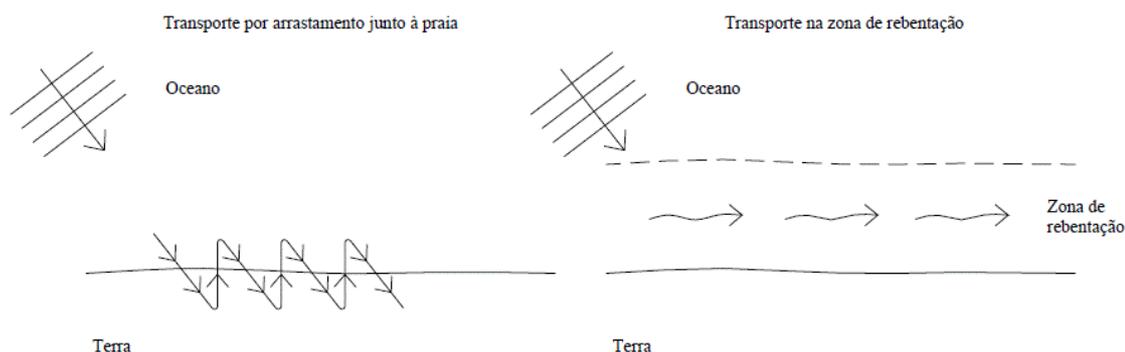


Figura 10 - Processos de transporte longitudinal (Coelho, 2005).

A deriva litoral é medida pela quantidade de sedimento que passa numa secção do litoral durante um determinado período de tempo, normalmente um ano. A deriva litoral correspondente à quantidade de sedimentos que as ondas incidentes na costa podem transportar designa-se deriva litoral potencial.

Para a estimativa do volume de areia transportado na praia (Q_s), em m^3 /dia, foi utilizada a seguinte equação empírica do Komar (1976) em que E é a energia das ondas na rebentação, C_n a velocidade de grupo das ondas e α_b o ângulo de incidência da onda na rebentação.

$$Q_s = 3,4 (E C_n)_b \text{ sen}\alpha_b \text{ cos}\alpha_b \quad (4)$$

A energia das ondas E pode ser determinada por a seguinte equação, em que ρ é a densidade da água do mar com valor igual a $1020 \text{ Kg} / \text{m}^3$, g a aceleração da gravidade com valor igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ e H_b é a altura da onda na rebentação.

$$E = \frac{1}{8} (\rho g H_b^2) \quad (5)$$

A deriva litoral anual pode ser muito variada, dependendo da agitação marítima desse ano, não sendo por isso necessário determiná-la com grande precisão; por isso, a ordem de grandeza que usualmente se utiliza para medir a deriva litoral anual é da ordem de 10^3 m^3 /ano. Em algumas praias arenosas, a erosão provocada pela deriva litoral constitui um grave problema, originado pela remoção do sedimento que é removido pelo transporte lateral das correntes litorais, de que resultam alguns casos de significativo recuo da costa.

1.3 As Marés

O fenómeno da variação do nível do mar, através de descidas e subidas duas vezes ao dia é designado por marés. Este fenómeno já era observado há milhares de anos e muitos observadores repararam nas posições das marés e as fases das luas e nos intervalos temporais diários entre os diferentes níveis das marés. No entanto só depois de Isaac Newton ter formulado a Lei da Atração Universal, no século XVII, é que se ficou a saber que o fenómeno das marés se deve às interações das forças gravitacionais da Lua e do Sol com os oceanos. As marés diárias são influenciadas principalmente pela interação entre a Terra e a Lua, que é o satélite mais próximo, e essas marés designam-se por marés lunares. Durante um dia lunar, existem duas marés baixas [figura 11] e duas marés altas [figura 12].



Figura 11 - Baixa-mar - Praia Boca Mar, Gaia (Nuno Vasconcelos, 2012).

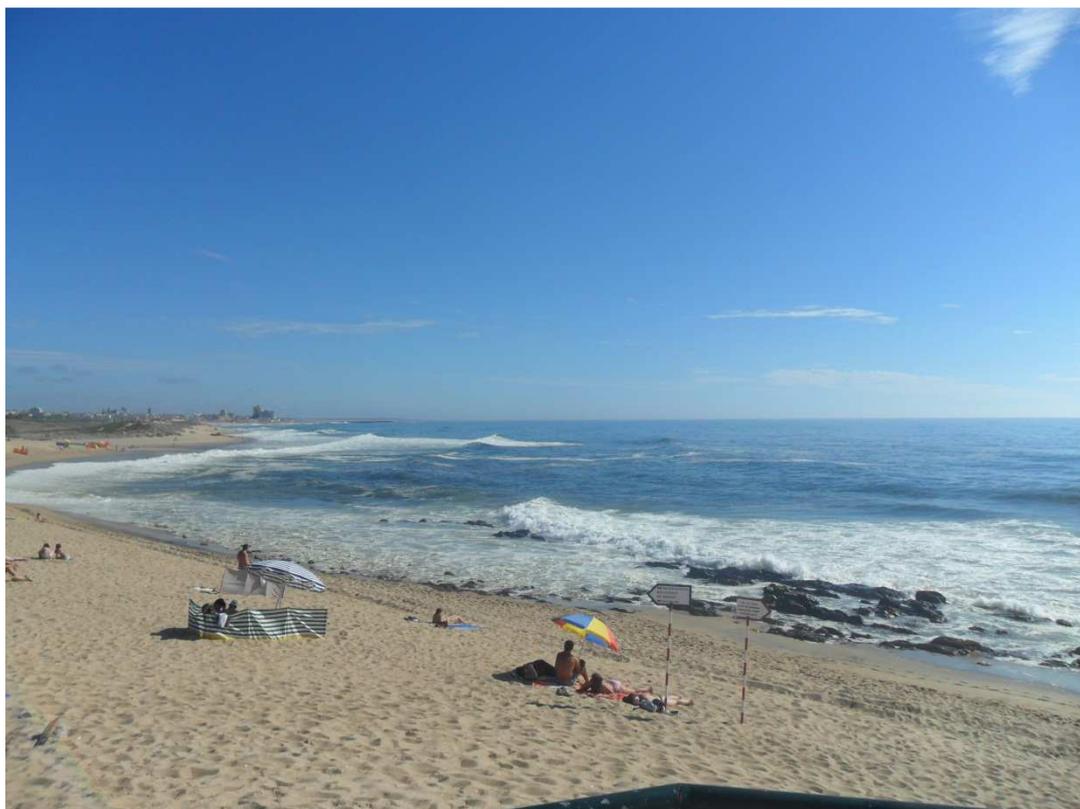


Figura 12 - Praia-mar - Praia Boca Mar, Gaia.

A Lua, à medida que realiza o seu movimento de rotação à volta da Terra, vai exercer sob os oceanos diferentes forças gravitacionais, dependendo da posição onde se encontra. No lado da Terra que se encontra mais próximo da Lua, o nível do mar vai encontrar-se mais alto, resultando nas marés altas, ou Praia-Mar. Do lado da Terra mais distante da Lua passa-se exatamente o contrário, dando até a impressão de que a Lua tivesse puxado o oceano para si, resultando daí as marés baixas, ou Baixa-Mar.



Figura 13 - Efeito da Lua nas marés diárias (Press & Siever, 2001).

A interação entre o Sol e a Terra também é causadora de marés. Embora esteja muito distante da Terra, o Sol, devido a sua grande massa, exerce também uma força gravítica significativa sobre os oceanos, originando marés que são designadas por marés solares. Estas marés são ligeiramente inferiores à metade das marés lunares. Enquanto as marés solares, que ocorrem à medida que a Terra realiza o seu movimento de rotação, têm a duração de 24 horas (um dia terrestre), as marés lunares, que ocorrem como resultado da rotação da Terra em relação à Lua, duram 24 horas e 50 minutos, estando por isso desfasadas entre si. É devido a este desfasamento que conseguimos observar as diferentes fases da Lua. Na Lua cheia e na Lua nova, a Terra, o Sol e a Lua encontram-se alinhadas e as forças gravíticas sobre as marés são reforçadas pela interação conjunta daqueles dois astros. As marés que daí resultam são marés altas, de alta amplitude, em que o nível do mar na Praia-mar é mais alto e o nível do mar na Baixa-mar é mais baixo. Estas marés são designadas de marés sizígia.

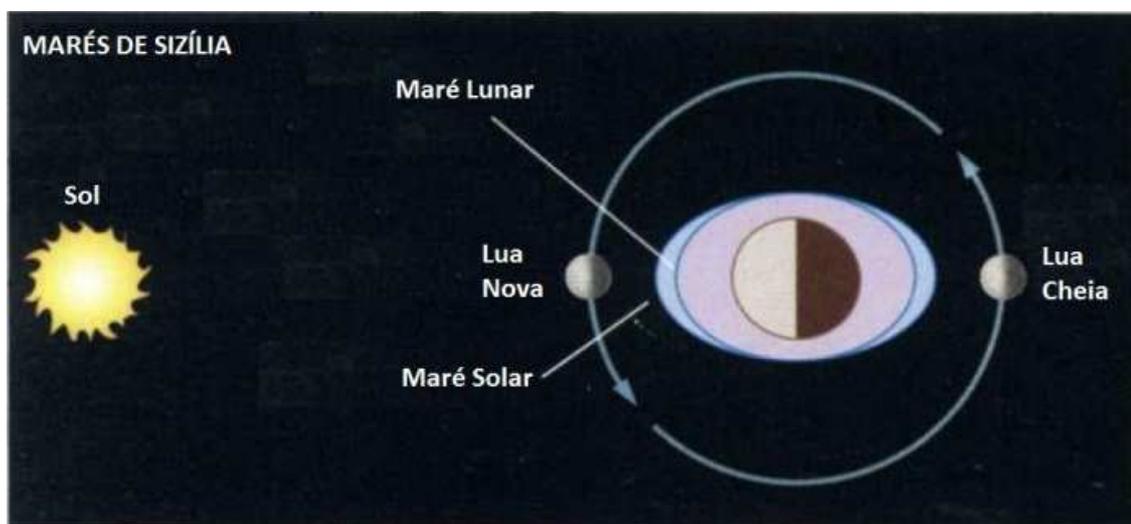


Figura 14 - Marés de sizígia (Press & Siever, 2001).

Nas fases em que a Lua se encontra em quarto minguante e quarto crescente, as marés lunares e solares apresentam-se menos reforçadas entre si dando origem a marés baixas, de baixa amplitude, sendo estas marés designadas por marés de quadratura.

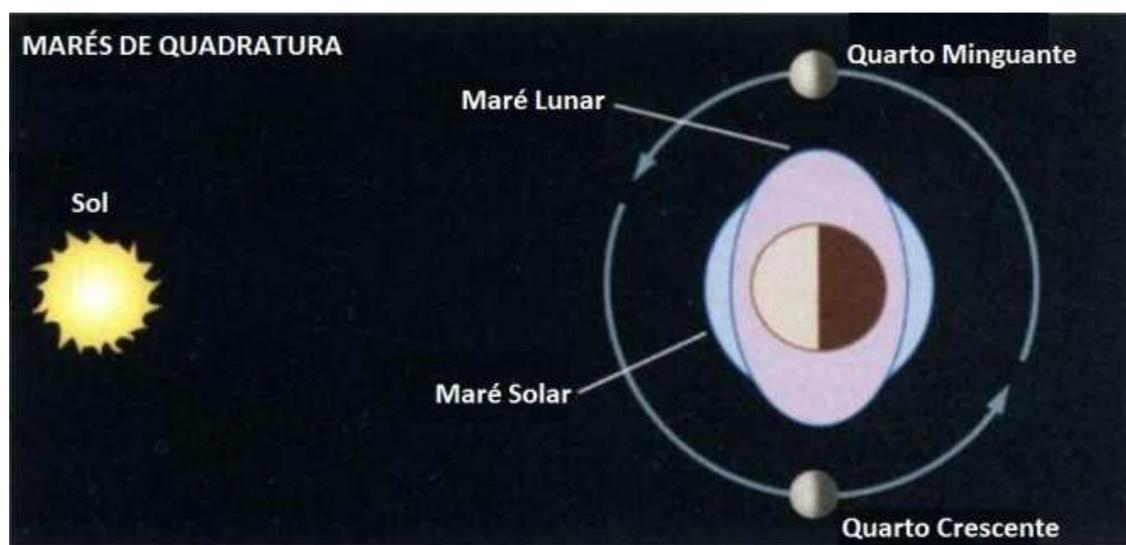


Figura 15 - Marés de quadratura (Press & Siever, 2001).

As marés dão-se em todos os lugares, mas variam em diferentes partes do oceano consoante a maior ou menor constrição e obstrução ao fluxo das marés. O poder erosivo e destrutivo do mar na costa ou o fenómeno de cheias e inundações devido a uma alta precipitação numa zona ribeirinha podem ser potenciados pelo fenómeno das marés.

1.4 As Praias

As praias são formações geológicas constituídas por partículas soltas de sedimentos ao longo de uma margem de água. Podem ser constituídas por areias, cascalho, pedras, calhaus, seixos e conchas. As praias oceânicas estão sujeitas a uma grande influência da erosão das ondas, das marés e dos fenómenos de deriva litoral, fatores estes que são determinantes na sua morfologia. Para que uma praia se mantenha estável, é necessário que haja um balanço entre a adição e remoção de areia [figura 16]. A adição de areia pode dar-se por fenómenos de erosão ao longo da praia, por transporte longitudinal através da deriva oceânica ou a partir do transporte de sedimentos pelos rios. Já a perda de areia pode ocorrer por ação do vento, podendo este transportar a areia para zonas dunares, para fora da praia ou

para o mar, ou por ação da deriva litoral, a areia ser transportada por correntes longitudinais.



Figura 16 - Balanço de areia numa praia por erosão, transporte e sedimentação (Press & Siever, 2001).

Nas praias distinguem-se duas zonas hidrodinâmicas fundamentais, a zona de rebentação e a zona de varrido [figura 17], zonas estas que constituem a antepraia.

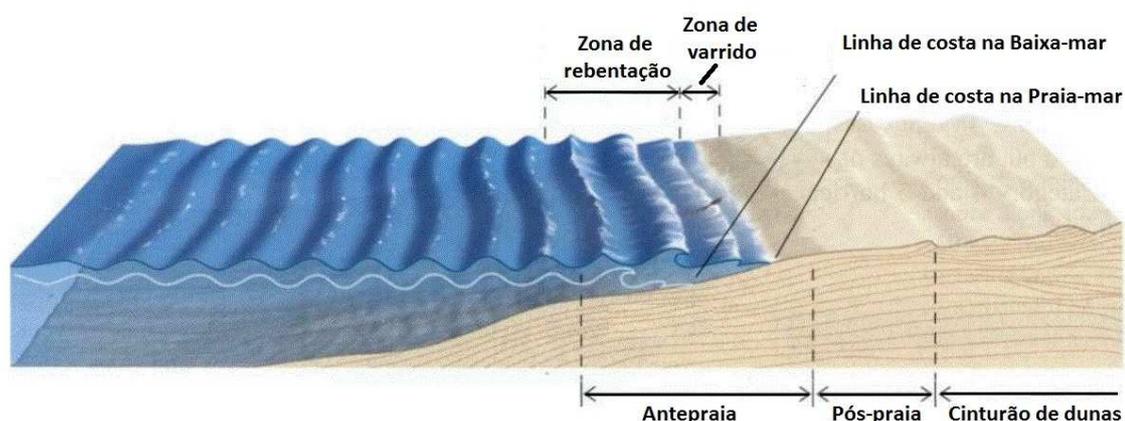


Figura 17 - Zonas de rebentação e varrido no perfil de uma praia (Press & Siever, 2001).

A zona de rebentação situa-se entre as zonas mais afastadas e próximas da praia onde as ondas quebram. Está associada aos fundos existentes no local, podendo tanto ser bancos de areia como fundos de rocha ou recife os responsáveis pela quebra das ondas. A zona de varrido, também designada por

zona de espraiamento, é a zona da praia onde se dá a excursão máxima e mínima da onda sobre a face da praia. É nessa região que ocorrem os fenômenos de *swash* e *backwash* responsáveis pelo transporte longitudinal da areia. Devido a variações do nível da água quer por agitação marítima, quer por influência das marés, a zona de varrido pode tornar-se alternadamente seca e molhada.

Na **pós-praia** dá-se a deposição de areias e outros sedimentos transportados pelo mar.

Finalmente, a zona da praia mais afastada do mar é o **cinturão de dunas**, se este existir, que constitui uma proteção eficaz ao avanço do mar. A grande vantagem que as dunas evidenciam face aos outros tipos de proteção costeira é o facto das dunas não serem uma estrutura rígida. O seu comportamento maleável, expandindo quando a água penetra entre as partículas que constituem as dunas, e voltando à sua forma inicial com o recuo da água, permite uma eficaz proteção costeira, sem destruição das dunas. A vegetação existente nas dunas, na sua maioria espontânea e adaptada a ambientes inóspitos, vai permitir a fixação dos sedimentos na duna oferecendo obstáculo à remoção por transporte do mar. A vegetação da duna apresenta também a vantagem de reter as areias transportadas da praia pelo vento permitindo a recuperação da duna após as tempestades [figura 18].

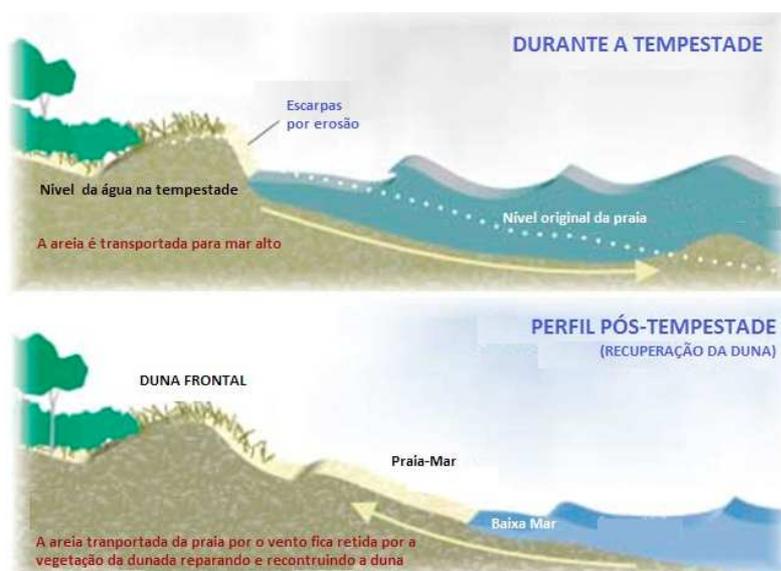


Figura 18 - Recuperação das dunas após tempestades (Waikato Regional Council).

As praias podem ser classificadas em dois tipos básicos de praias, as praias **refletivas** [figura 19] e as praias **dissipativas** [figura 20]. As praias intermediárias abrangem todas as que situam entre os extremos do tipo de praia refletiva e dissipativa, tendo conseqüentemente características mistas desses dois tipos básicos de praias. Os fatores fundamentais para as praias serem descritas em termos de refletivas e dissipativas são a sua inclinação e a característica dos grãos. Serão estes fatores que vão influenciar o tipo de rebentação que vai ocorrer nas praias. As praias do tipo refletivo são consideradas praias de baixa energia e geralmente têm ondas de menor tamanho. Estas praias tendem a ser bastante inclinadas, com granulometria grosseira, são curtas relativamente aos outros tipos de praias e não têm bancos de areias. O tipo de rebentação ascendente é muito comum a este tipo de praias.

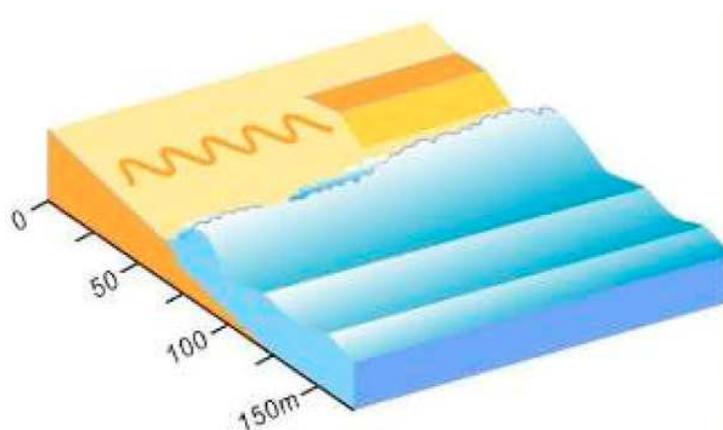


Figura 19 - Praia do tipo refletivo (Leite, 2010).

As praias do tipo dissipativo, também chamadas de praias de alta energia, são geralmente muito largas e muito pouco inclinadas. A sua zona de rebentação (*surf zone*) é muito extensa podendo ter mais de que uma bancada de areia, bancada esta que vai ser responsável pelo quebrar das ondas devido à diminuição da profundidade. É nessa zona que se processa a dissipação da energia das ondas, estando essa zona de rebentação sujeita a uma forte erosão.

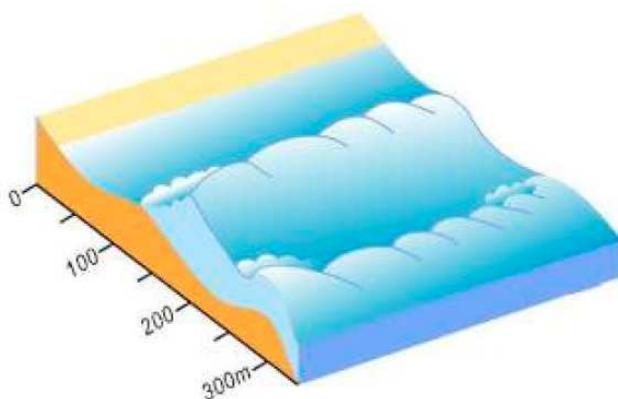


Figura 20 - Praia do tipo dissipativo (Leite, 2010).

1.5 A Erosão Costeira em Portugal

A costa portuguesa, devido à sua elevada exposição à forte ondulação atlântica, é uma costa bastante sujeita a fenômenos de erosão costeira. Cerca de 80% da população mundial habita nas zonas litorais, não sendo Portugal exceção na distribuição da população nas zonas litorais, visto que mais de metade da sua população habita em concelhos dos cerca de 1450 km de costa portuguesa (www.prof2000.pt). A costa portuguesa, embora seja maioritariamente constituída por praias, também é constituída por zonas predominantemente rochosas contemplando dois tipos principais de costa: o tipo de costa de arriba [figura 21] e a costa de praia [figura 22]. Enquanto na costa de arriba a linha de costa está inserida num alto relevo formado por rochas mais resistentes, a costa de praia é arenosa e situa-se num baixo relevo.



Figura 21 - Costa de arriba - Praia da Arrifana - Aljezur (Wikipédia, 2012).



Figura 22 - Costa de praia - Praia de Cortegaça - Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).

A tipologia da costa [figura 23] vai ser bastante influente nos fenómenos de erosão local visto que a erosão numa costa de arriba manifesta-se com grande intensidade, desgastando as rochas de alta dureza, enquanto que nas costas de praia o facto de o fundo ser mais baixo, faz com que as ondas marítimas quebrem e a energia erosiva das ondas seja dissipada.

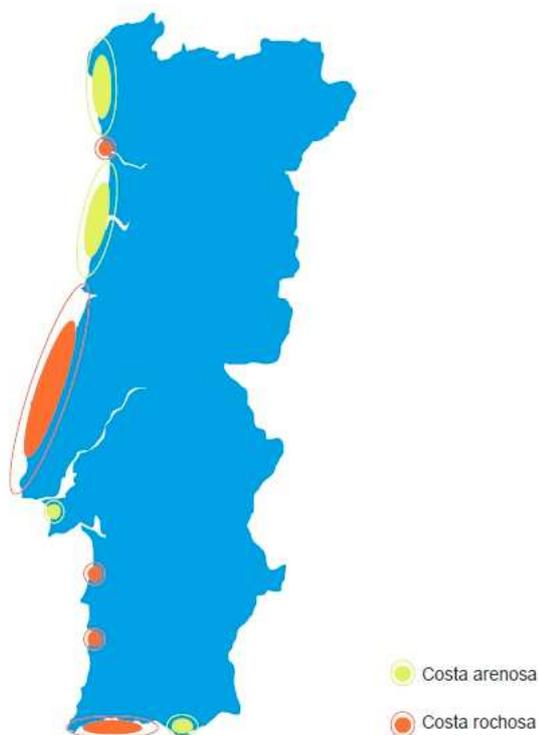


Figura 23 - Tipologia da costa portuguesa (INAG, 2005).

Portugal é um dos países da Europa que mais sofre com a erosão costeira. Segundo um estudo da União Europeia (Eurosion, 2004), um terço da costa portuguesa está a ser destruído pela erosão costeira, situando Portugal no quarto lugar dos dezoito países com maior erosão costeira da UE. Nesse estudo também é referido que um quinto da costa já foi severamente afetado, estando esta a perder terreno em relação ao mar a um ritmo entre 0,5 a 2 metros por ano e em alguns locais a registos de 15 metros em situações mais drásticas. Espinho foi uma das zonas mais afetadas pela erosão costeira, chegando a perder ruas e uma quantidade significativa de casas e edifícios para o mar [figura 24].

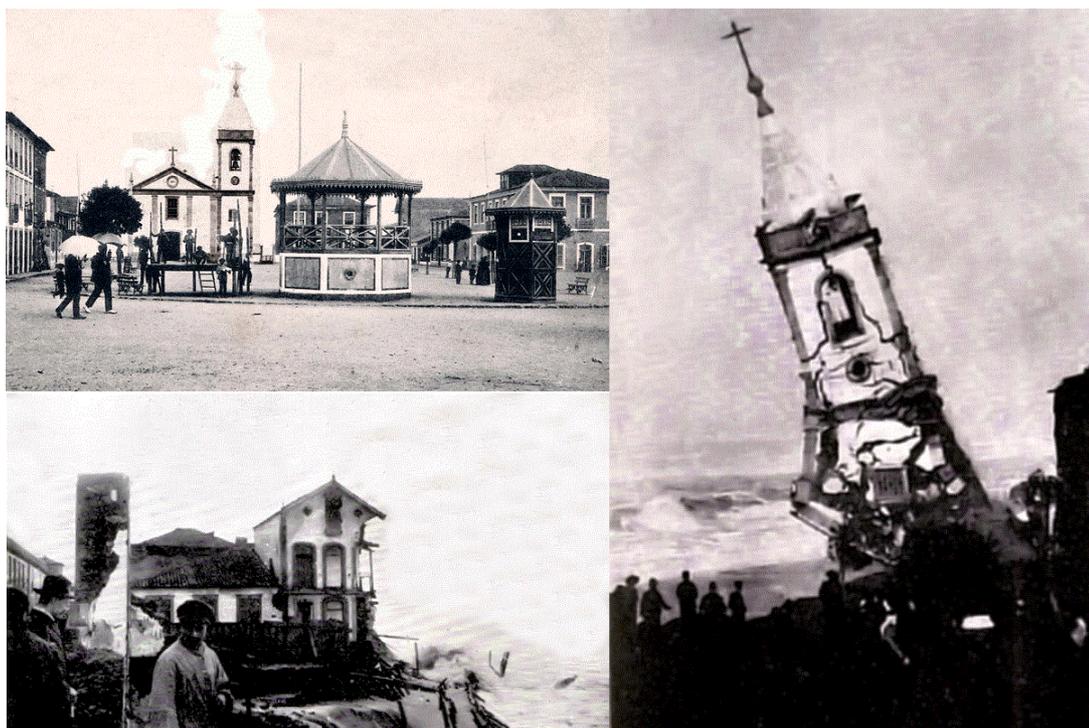


Figura 24 - Espinho foi umas das zonas da costa portuguesa mais afetada pela erosão (Leite, 2010).

Na Europa, a intervenção humana é um dos fatores que mais tem vindo a potenciar a erosão costeira, principalmente pela construção de barragens [figura 25], em cujas albufeiras a areia fica retida, restando apenas a zona a jusante da barragem mais próxima da foz do rio disponível para contribuir com sedimentos para as zonas costeiras, e pela elevada extração de areias que são retiradas para ser utilizadas na construção. A extração e retenção de areias vai afetar o balanço de areias nas praias por falta de alimentação.

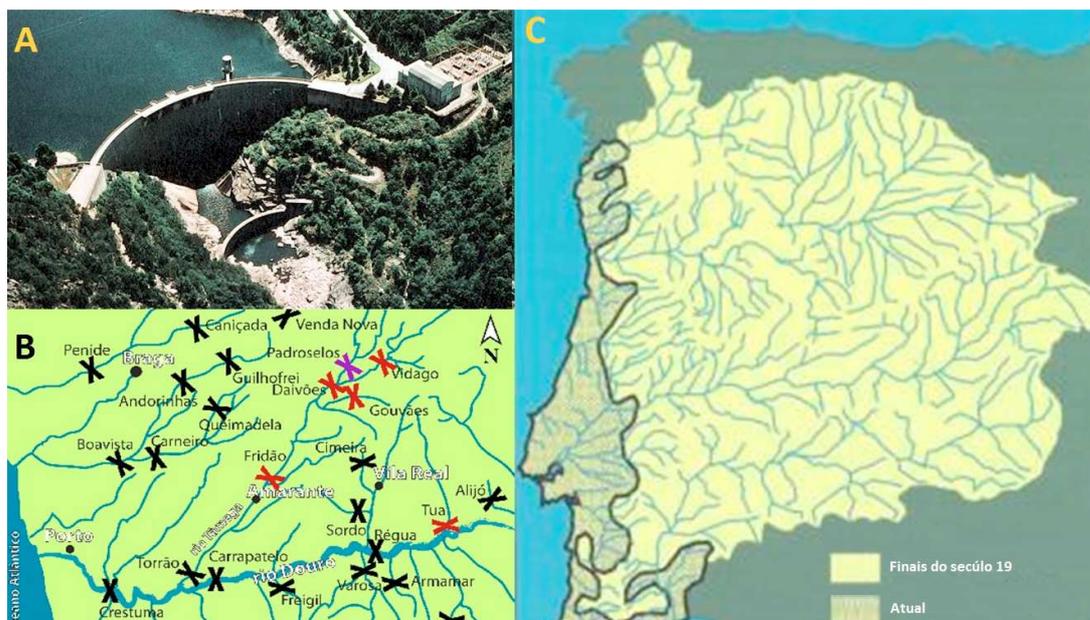


Figura 25 - A influencia das barragens na alimentação de sedimentos. A - Fotografia de uma barragem, B - Localizações das barragens mais próximas da foz do rio Douro, C - Areas disponíveis para transporte de sedimento do continente para o oceano. (Leite, 2010).

A destruição de ecossistemas e de outras áreas ecológicas costeiras também contribui para o aumento da erosão, visto estar-se a destruir proteções naturais ao avanço do mar sobre a costa.

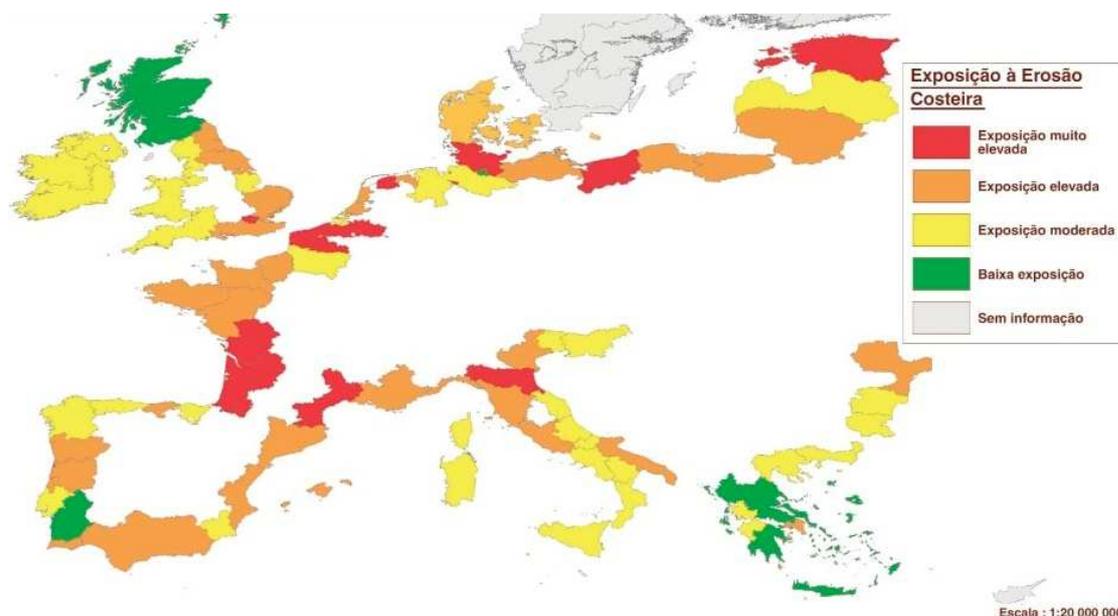


Figura 26 - Exposição do Litoral da Costa Europeia à erosão (Eurosion, 2004).

Portugal, com uma das costas mais expostas e energéticas da Europa [figura 26], enfrenta diferentes problemas relacionados com a erosão costeira, alguns associados apenas causas naturais combinadas com a tipologia do país, e outros associados à intervenção humana, seja por construções de barragens e extrações exageradas de areias, por construções em lugares indevidos ou por obras de proteção costeira e transferiram a erosão, às vezes de modo ampliado, para locais a jusante (no caso da costa portuguesa para sul devido as correntes marítimas vindas de noroeste). As correntes marítimas responsáveis pela direção da deriva litoral de norte para sul são geradas pela ondulação predominante com a direção de noroeste na costa portuguesa [figura 27].

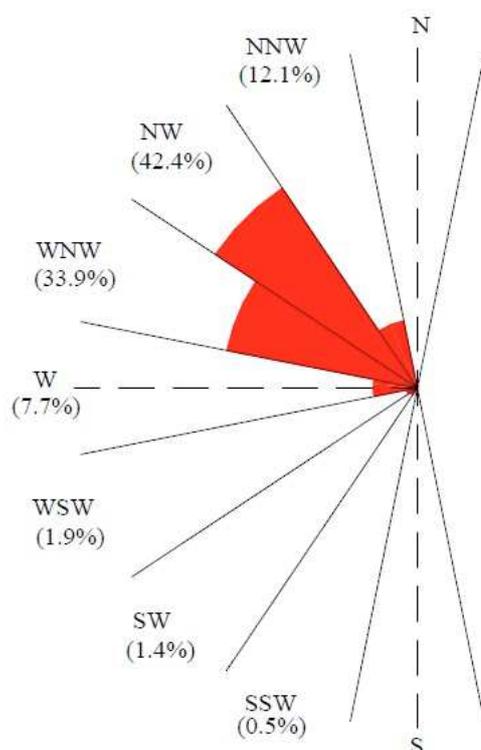


Figura 27 - Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003) (Coelho, 2005).

A costa portuguesa em geral sofre de um recuo da linha de costa em relação ao mar face às zonas de avanço, existindo zonas especialmente sensíveis a variações do nível do mar bastante propícias a inundações, devido a sua baixa altitude em relação ao nível mar [figura 28].



Figura 28 - Recuo, avanço e vulnerabilidade da linha de costa (Pereira C. A., 2010).

A erosão costeira em Portugal, embora se dê um pouco por todo o país, é mais preocupante, segundo o estudo da EU (Eurosion, 2004), na zona Norte e Centro do país, em que 60% da linha de costa do norte e 52% da costa do Centro, se encontram atingidas por fenómenos erosivos preocupantes [tabela 1]. A zona menos afetada pelos fenómenos erosivos é a da costa alentejana. A zona de Lisboa e Vale do Tejo é a zona em que existe o maior número de população a ser afetada pela erosão e consequentes inundações. Segue-se a costa norte como a zona onde a população é mais afetada, sendo esta costa a zona do país onde se localiza o maior número de estruturas de defesa.

Região	Área (km ²)	Linha de Costa (Km)	Área sobre erosão (km ²)	% da área em erosão	Linha de costa em erosão (km)	% da linha de costa em erosão	Linha de costa com estruturas de defesa (km)	População em área afecta por erosão	Área urbanizada ou industrial em risco de erosão (km ²)	Área de grande valor ecológico em risco de erosão (km ²)
Norte	21.231	143	149	1	91	64	60	136.197	25	73
Centro	23.557	150	704	3	78	52	25	132.954	23	377
Lisboa e Vale do Tejo	12.023	322	782	7	109	34	34	829.264	62	485
Alentejo	26.829	126	354	1	-	-	8	20.808	13	299
Algarve	4.994	231	315	6	60	26	4	204.166	32	295
Portugal	88.634	972	2.305	3	338	35	131	1.323.389	155	1.529

Tabela 1 - Zonas de exposição à erosão de Portugal continental (Eurosion, 2004).

Os resultados obtidos pelo projeto EuroSION (EuroSION, 2004) também mostram que mais de 330 km da costa se encontram sob erosão, afetando uma área de aproximadamente 2300 km² e que abrange cerca de 1,3 milhões de pessoas, ou seja, mais de 10% da população de Portugal. Na tabela seguinte [tabela 2] podemos observar as taxas médias de recuo mais preocupantes no país, com um importante destaque para as zonas costeiras do Furadouro, Espinho - Cortegaça [figura 29] e Costa Nova - Vagueira [figura 30] que, além dos recuos preocupantes, se encontram bastante artificializadas por obras de proteção costeiras.

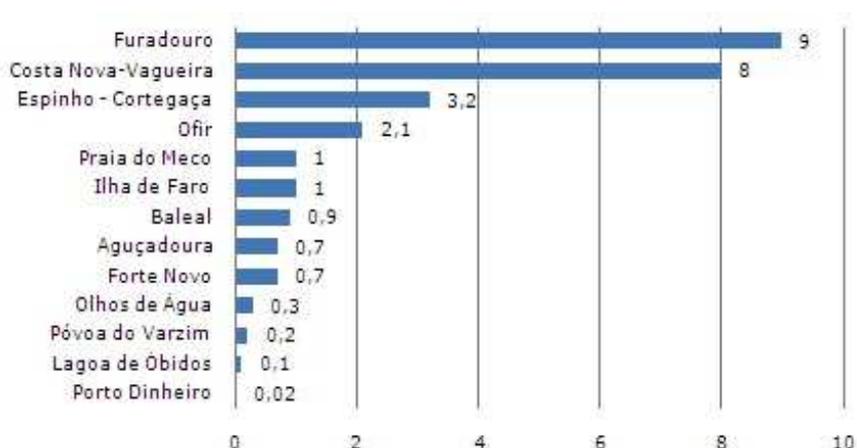


Tabela 2 - Taxa média de recuo (m/ano) em Portugal continental (INAG, 2005).



Figura 29 - Erosão Costeira - Praia de Cortegaça, Ovar (Nuno Vasconcelos, 2012).

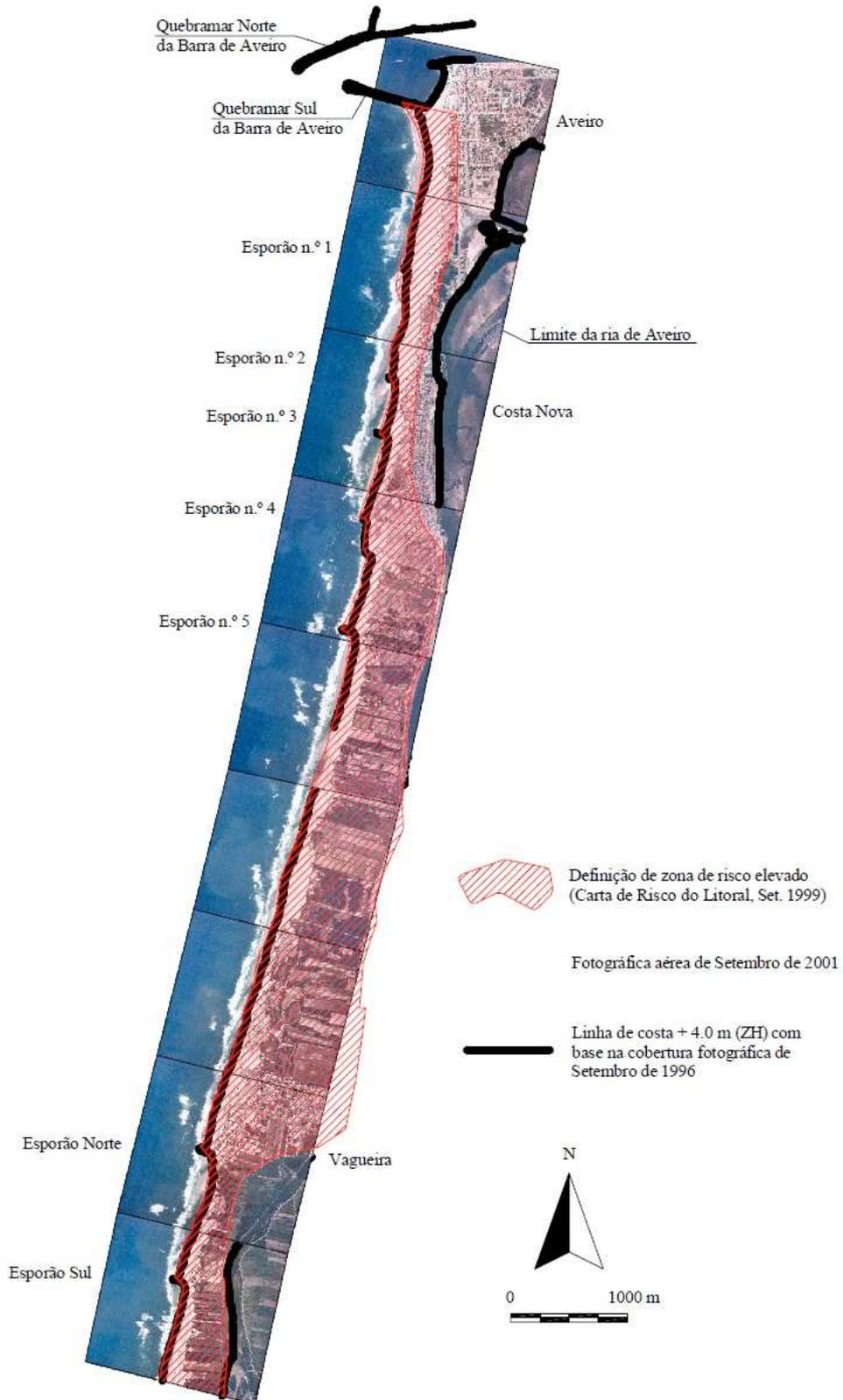


Figura 30 - “Carta de Risco” no trecho Barra - Vagueira (Coelho, 2005).

Capítulo 2

Obras de Proteção Costeira

Neste capítulo, além de se focar as funções das obras de proteção costeira e os tipos de obras de proteção mais conhecidos, irá também ser abordada a sua estrutura e interação com o mar, e sendo apresentadas como exemplos algumas aplicações de obras costeiras em Portugal.

2.1 Função das Obras de Proteção Costeira

A função das obras de proteção costeira, como o seu nome indica, é proteger as áreas litorais que se encontram sobre o risco de erosão. Estas destinam-se a “evitar” ou a minimizar o efeito erosivo do mar nas costas litorais, de maneira a proteger as construções humanas do efeito fortemente erosivo do mar. As zonas costeiras são locais muito atrativos, de elevado valor e por isso muito procurados; apesar das legislações, continuam a fazer-se construções em locais indevidos. Segundo um caderno técnico elabora pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) é citado que *“Apesar da legislação protetora e restritiva do DPM, dos POOC, da REN e dos próprios PDM, a faixa costeira funciona como um poderoso “ímã” de atração irresistível para todos os que desejam possuir um espaço único da paisagem*

marítima. Contando com isso, as empresas imobiliárias instalam-se, delimitam terrenos, esboçam lotes e volumetrias que possam realizar o sonho do pedaço de mar, conseguindo a desregulamentação de sucessivas parcelas da faixa costeira, o alargamento da mancha urbana por necessidades sociais e turísticas, a instalação de equipamentos e serviços imprescindíveis e a abertura de vias de comunicação e parques de estacionamento que, por si só, valorizam o preço do solo e incentivam novas construções” (ANPC, 2010). Estas construções em locais indevidos poderão estar sujeitas ao poder erosivo do mar, ou estar a danificar e a alterar os ecossistemas naturais de proteção [figura 31] da costa pondo outros locais em risco.



Figura 31 - As dunas costeiras estabilizam a linha de costa e constituem uma barreira natural contra as recessas do mar - Praia de Silvade, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).

A exploração de inertes ou a construção de barragens também pode alterar os balanços de sedimentos que podem também por em riscos locais que naturalmente eram seguros e, que devido à redução de sedimentos, deixaram de o ser. A própria construção de obras de proteção costeira, embora muitas vezes resolvendo o problema no local, agrava os problemas noutros locais através do aumento do poder erosivo nas vizinhanças: devido à interrupção da

deriva litoral, muitas vezes a costa a sotamar fica com falta de fornecimento de areia e conseqüentemente menos protegida da erosão do mar. Hoje em dia, e cada vez mais, se procura evitar a construção em locais indevidos, e as obras de proteção costeira escolhidas são cada vez mais adequadas para evitar a erosão no local a proteger, sem esquecer os potenciais impactos que estas possam ter a jusante.

2.2 Tipos de Obras de Proteção Costeira

Existem variadíssimos tipos de obras de proteção costeira. Cada tipo de obra tem uma função específica e deve ser adequado ao local a proteger sem esquecer as alterações que podem acontecer na dinâmica marinha local. As obras de proteção costeira podem ser obras longitudinais aderentes, obras longitudinais não aderentes, obras transversais ou recifes artificiais.

Os paredões de enrocamentos são utilizados como uma proteção longitudinal aderente. São formados através da colocação de uma grande quantidade de blocos rochosos, os enrocamentos, dispostos paralelamente à praia. Estas estruturas longitudinais desenvolvem-se ao longo da praia e têm como principal objetivo proteger temporariamente as construções a beira mar. Com a edificação de um paredão, a praia adquire tendência a estreitar, ficando a praia submersa mais inclinada. Este tipo de proteção pode ter a desvantagem de fazer com que a praia desapareça com o avanço do mar, sendo por esta posteriormente danificado e levando em alguns casos a ter que ser construído um paredão ainda de maior dimensão. O efeito que este tipo de estrutura causa na inclinação da praia nem sempre é uma desvantagem, sendo esta técnica por vezes utilizada para aumentar a profundidade nas margens, facultando a construção de ancoradouros onde barcos possam atracar.

Os paredões de enrocamento [figura 32] necessitam de manutenção, tendo que ser renovado e/ou reforçado o enrocamento com uma periodicidade que pode ser maior ou menor consoante a sua exposição à energia do mar.



Figura 32 - Paredão de Enrocamento - Praia de Silvade, Espinho
(Nuno Vasconcelos, 2012).

As obras aderentes em betão armado são também um tipo de proteção longitudinal aderente e, tal como os paredões de enrocamento, têm a função de proteger temporariamente as construções à beira mar. Este tipo de estruturas têm a vantagem de estas poderem ser construídas com formas que ajudem a dissipar a energia das ondas no impacto, minimizando estragos na estrutura [figura 33].



Figura 33 - Esquema de uma obra aderente em betão armado que permite a dissipação da energia das ondas devido a sua parede em forma cilíndrica.

Os quebra-mares destacados são obras longitudinais não aderentes e dispõem-se paralelamente à linha de costa, diminuindo o poder erosivo das ondas na costa desse local. Os quebra-mares, além de protetores das zonas costeiras, têm diferentes utilidades: tanto podem ser usados para criar zonas de abrigo para entrada de embarcações nos portos ou em zonas de refúgio e para desviar a deposição de sedimentos dos canais de acesso, como também podem ser utilizados na criação de área útil nas praias. Este tipo de estrutura é bastante eficaz para proteger as zonas costeiras das ondas que atingem o litoral paralelamente a linha de costa. Os quebra-mares podem ser construídos distanciados da costa ou podem ter uma das extremidades ancorada em terra adquirindo uma forma arredondada ou em forma de “L” [figura 34].

Em alguns casos, a estrutura pode mesmo ficar ligada à praia por deposição sedimentar, formando um tombolo [figura 35]. Um tombolo é formado através do aparecimento de uma praia convergente na zona protegida (zona de sombra), situada entre o quebra mar e a costa, por transporte sedimentar convergente fazendo com que a praia fique ligada à estrutura.

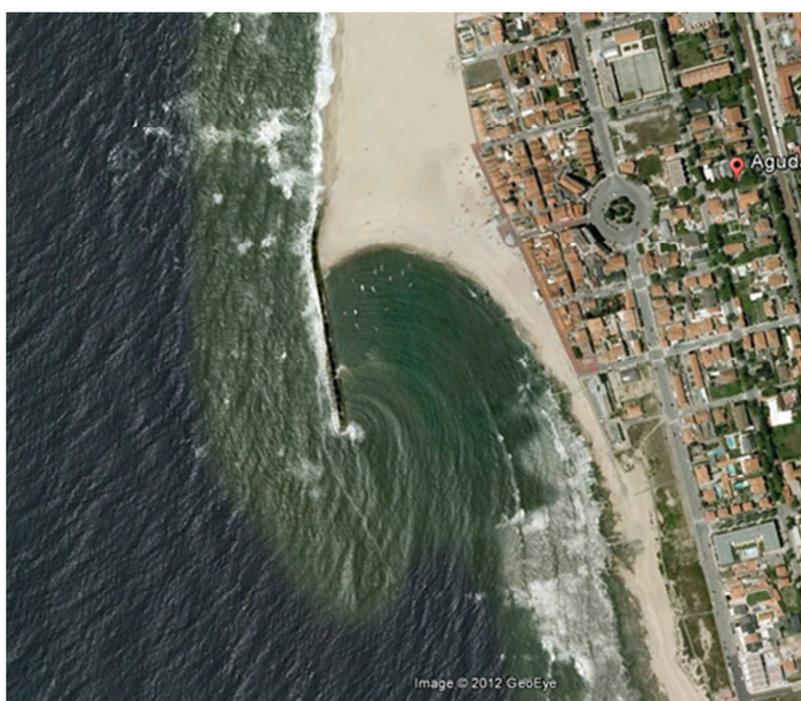


Figura 34 - Quebra-mar - Praia da Aguda, Gaia (Google Earth, 2012).

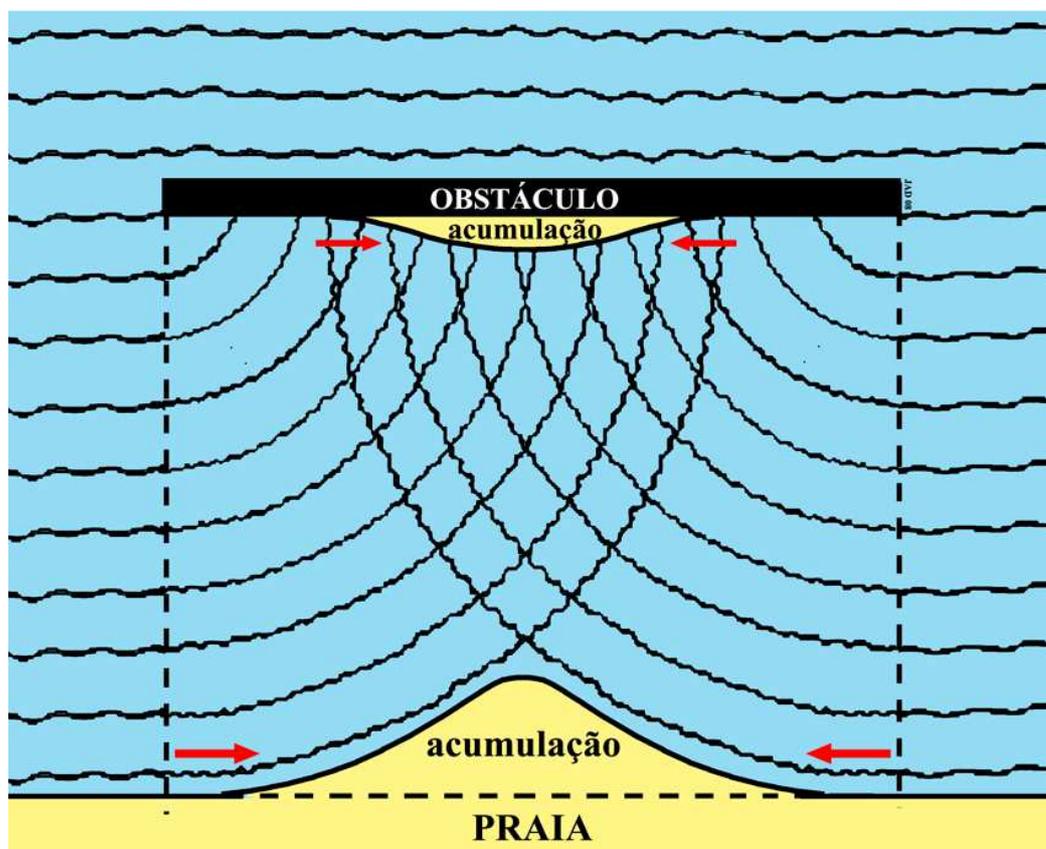


Figura 35 - Formação de um tombolo
(Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2010).

Dentro das obras transversais destacam-se os esporões [figura 36] e os molhes [figura 37]. A principal função de um esporão é provocar o enchimento de uma zona de costa sujeita à erosão através da interrupção do caudal sólido (interrupção da deriva litoral); mediante o posicionamento do esporão, provocar-se-á deposição de sedimentos em frente à zona em causa, com o objetivo de criar uma praia ou aumentar uma já existente.

As condições necessárias para que o esporão tenha utilidade são: a existência de transporte litoral e que o comprimento do esporão seja o suficiente para corrigir a zona de máximo transporte, a zona de rebentação. O inconveniente deste tipo de estruturas é o facto de estas interromperem a deriva litoral provocando a quebra do equilíbrio dinâmico, eventualmente a jusante (sotamar) do esporão, ou seja, privando esta zona da alimentação de areias potenciando assim o aumento da erosão. Existem esporões com formas especiais, com funções específicas. Por exemplo, os esporões com forma de

“L”, “S” ou “Z” provocam fenômenos de bi-fracção, acumulando alguma areia a jusante do seu posicionamento e deste modo minimizando a erosão no esporão e na costa. Por exemplo, um esporão em forma de “S”, além de reter areias a jusante do esporão, contribui para a formação de um banco de areia a jusante que faz com que as ondas quebrem antecipadamente, dissipando assim, a energia das ondas que iriam atingir a costa.

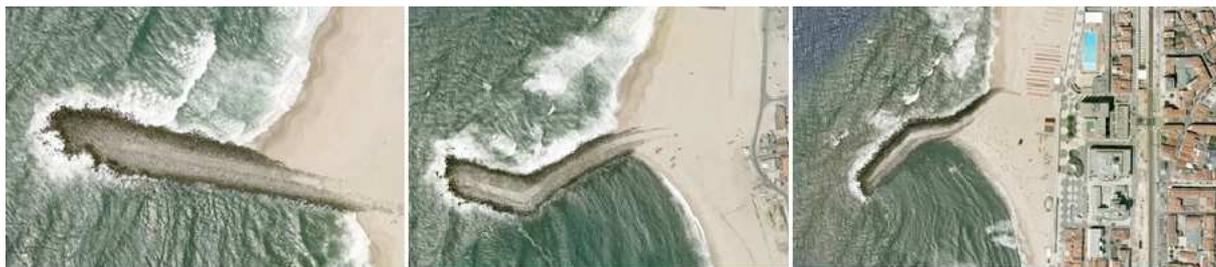


Figura 36 - Diferentes formas de esporões (Google Earth, 2012).

Os molhes são predominantemente utilizados na estabilização das zonas de navegação de bocas de rios. As suas principais funções são o confinamento e controlo de correntes e marés e o de prevenir as cheias. Este tipo de estrutura, tal como o esporão, interrompe o transporte sedimentar da deriva litoral, aumentando a acreção de areia a montante (barlamar) e impedindo a deposição de areias a jusante (sotamar). Devido às grandes dimensões dos molhes, os fenômenos de erosão a sotamar podem ser significativos, visto os molhes terem um comportamento semelhante ao esporão de grandes dimensões.



Figura 37 - Molhes do Douro (Google Earth, 2012).

Os recifes artificiais [figura 38] funcionam com um quebra-mar submerso e tem como principal objetivo proteger as praias da erosão, através da redução e dissipação da energia das ondas que atingem a costa. O funcionamento destas estruturas assenta no principio da redução da profundidade, criando uma zona de rebentação, pelo menos para as ondas maiores, que vai fazer com que as ondas depois de já terem quebrado, não atinjam a costa com tanta violência. Além das funções protetoras, este tipo de estruturas proporciona abrigo e fixação de espécies marinhas, criando condições para o desenvolvimento de espécies de fauna e flora, além de poderem propiciar a prática de desportos de ondas, como é o caso do surf e do bodyboard (embora que a tecnologia para utilizar essas estruturas nessas práticas desportivas não esteja ainda muito desenvolvida). Os recifes artificiais apresentam também a vantagem das correntes criadas pela rebentação estarem afastadas da linha de costa e, tal como os quebra-mares, fazerem com que os sedimentos se acumulem por efeito de tombolo na zona entre a praia e o recife.



Figura 38 - Estrutura de um recife artificial no Algarve (Unibetão, 2011).

2.3 Estrutura das obras de Proteção Costeira

As estruturas das obras de proteção costeira podem ser constituídas por blocos naturais, os enrocamentos, ou por blocos de betão, muitas vezes com formas especiais para facilitar o encaixe entre os elementos estruturais e aumentar a eficiência na dissipação da energia das ondas, como é o caso dos tetrápodes. Os tetrápodes são peças de betão simples cuja geometria é constituída por quatro patas, sendo por isso mesmo designados por pés de galinha [figura 39]. Esta estrutura é constituída por quatro troncos de cones, as patas, exatamente iguais e simetricamente colocados em relação a um núcleo central que os une [figura 40].

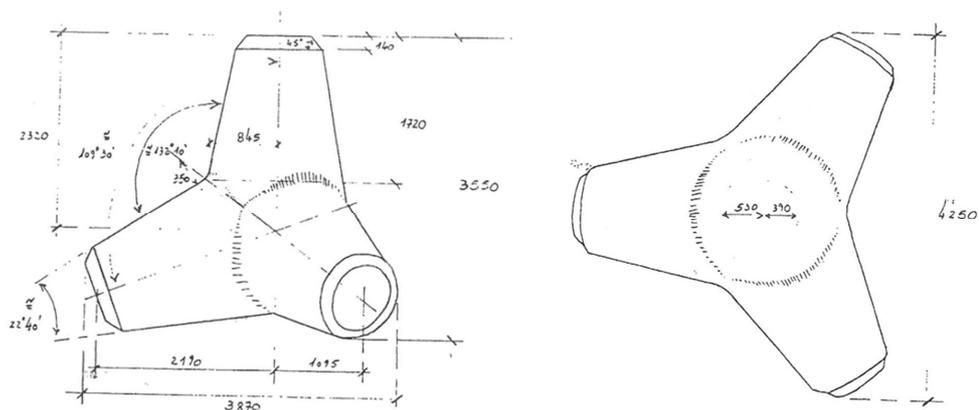


Figura 39 - Geometria lateral e de topo de um tetrápode
(Silva, Guimarães, & Nunes, 2010).

As medidas geométricas dos tetrápodes têm de ser estabelecidas com uma tolerância rigorosa da ordem de mais ou menos um centímetro, de modo que o seu volume nunca resulte inferior a 12 m^3 , o que corresponde a uma massa média de 30 toneladas por unidade.



Figura 40 - Reserva de tetrápodes na praia de Silvade, Espinho
(Nuno Vasconcelos, 2012).

Em muitos casos surgem combinados, nas estruturas das obras de proteção costeira, blocos naturais e blocos de betão, nas zonas de impacto. Combinações de enrocamentos com tetrápodes nas zonas de impacto são muito comuns em esporões [figura 41].

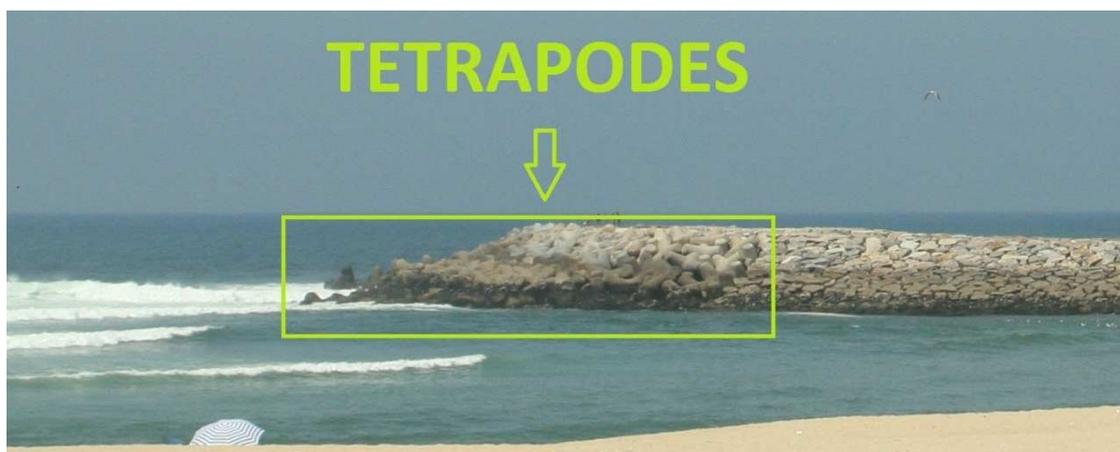


Figura 41 - Esporão de enrocamento com tetrapodes na zona de impacto - Praia dos Pescadores, Espinho (Nuno Vasconcelos, 2012).

2.4 Utilização de enrocamento nas obras de proteção costeira

Na estrutura das obras de proteção costeira são utilizadas diferentes gamas de granulometria, classificadas segundo diferentes gamas de peso [figura 42]. Usualmente, nas obras de proteção costeira o núcleo é preenchido por enrocamento TOT, todo-o-tamanho, sendo as camadas superiores constituídas por classes de peso mais elevado às subjacentes.

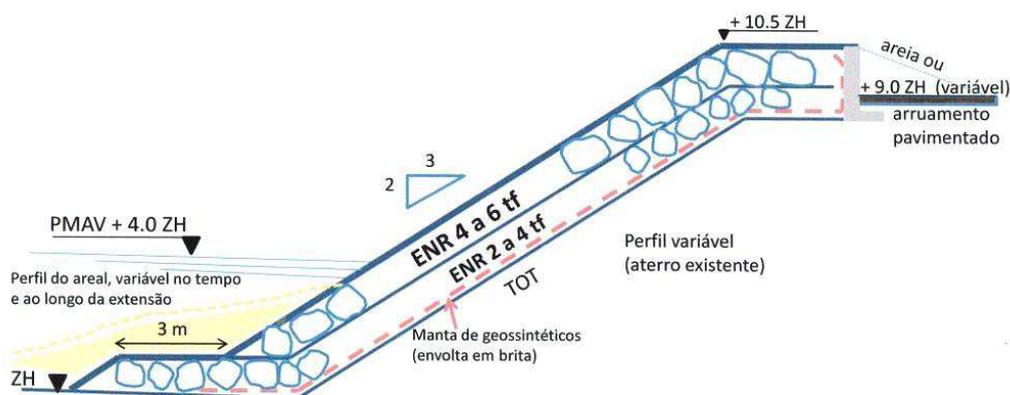


Figura 42 - Estrutura longitudinal aderente, Mindelo (Gomes F. V., 2011).

Na obra seguinte, temos um exemplo duma estrutura de dois esporões constituídos por enrocamento. A obra consistiu na reconstrução dos esporões da Praia de Mira prevista no POOC de Ovar-Marinha Grande. Segundo o

relatório de situação final elaborado por o INAG (INAG, 2006), os dois esporões reconstruídos estão distanciados entre si cerca de 800 metros e com um comprimento de 170 metros, de forma a assegurar a retenção de areia com o objetivo de proteção da frente urbana. A estrutura adotada foi uma secção de tipo trapezoidal, constituída por um manto em enrocamento TOT (Todo-o-tamanho) selecionado, envolto por filtro intermédio (uma fiada) sobre o qual assentaram duas fiadas de enrocamento do manto exposto [figura 43]. Foram também adotados perfis simétricos face à ocorrência, com probabilidade muito elevada de galgamentos. Nos mantos expostos foram adotados pesos de blocos para duas diferentes situações, entre 4 a 6 toneladas no enraizamento dos esporões, 6 a 9 toneladas no trecho perpendicular à praia e 9 a 12 toneladas na cabeça dos esporões.

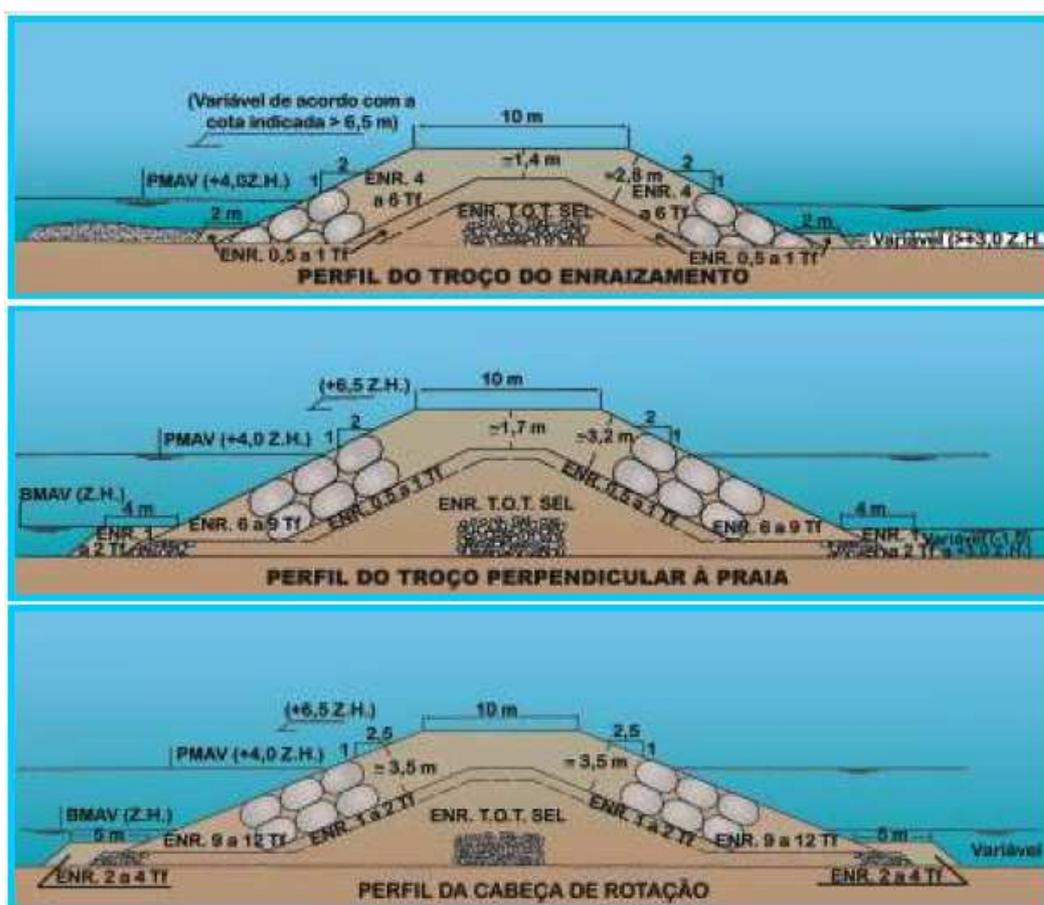


Figura 43 - Estrutura dos esporões da Praia de Mira (INAG, 2006).

2.5 Exemplos de Aplicações de Obras Costeiras na Costa Portuguesa

Neste subcapítulo irão ser apresentadas como exemplo quatro obras emblemáticas realizadas na costa norte portuguesa em que os enrocamentos foram bastante utilizados (Irmãos Cavaco, SA).

Os molhes na foz do Douro (Porto-Gaia) consistiram na construção de três obras de proteção: o Molhe Norte, com cerca de 450m de comprimento, constituído por elementos pré-fabricados de betão armado (caixotões e aduelas), encabeçados por uma superestrutura em betão; o Quebra-mar destacado, com cerca de 500 m de comprimento, constituído por um núcleo e camadas intermédias de proteção em enrocamento e por um manto de proteção em blocos Antifer em betão de alta densidade e ainda a obra de reforço do Cabedelo que se desenvolve transversalmente à praia ao longo de 460m. Os trabalhos compreenderam também as dragagens necessárias ao estabelecimento do canal de navegação, cujas areias foram depositadas no Cabedelo.

Principais Quantidades	
Dragagem de areias e sua colocação no Cabedelo:	200.000 m ³
Quebramento de rocha no canal e fundações da obra:	4.000 m ³
Enrocamento de várias granulometrias nos molhes e retenções:	350.000 m³
Betão de alta densidade em blocos artificiais:	32.000 m ³
Betão armado em caixotões e outras peças pré-fabricadas:	16.000 m ³
Betão para preenchimento de células e na superestrutura dos molhes:	54.000 m ³

Tabela 3 - Quantidade de materiais - Molhes do Douro (Irmãos Cavaco, SA).



Figura 44 - Quebra Mar Destacado - Foz do rio Douro (Irmãos Cavaco, SA).

A reabilitação dos esporões e das defesas aderentes de Esmoriz, de Cortegaça e do Furadouro consistiu na reparação de seis esporões - Norte e Sul de Esmoriz, Norte e Sul de Cortegaça e Norte e Sul do Furadouro, na reparação da defesa aderente entre o esporão Norte de Esmoriz e o esporão Norte de Cortegaça, numa extensão de dois mil metros, e na reparação da defesa aderente a Sul do esporão Sul do Furadouro, numa extensão de cem metros.

Principais Quantidades	
TOT:	60.300 m³
Enrocamentos Selecionados:	196.630 m³
Betão Simples:	2.045 m ³

Tabela 4 - Quantidade de materiais - Esporões Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Irmãos Cavaco, SA).



Figura 45- Esporão da Praia da Maceda, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).

A execução do Quebra-Mar Destacado da Aguda consistiu na construção de um quebra-mar com cerca de 330 m de comprimento, constituído por núcleo e mantos de proteção em enrocamento, sendo coroado por uma superestrutura em betão com uma largura de 6m.

Principais Quantidades	
Dragagem:	6.000 m ³
TOT:	3.000 m³
Enrocamento de 70 a 90 KN:	10.600 m³
Enrocamento de 90 a 120 KN	9.400 m³
Betão:	15.750 m ³

Tabela 5 - Quantidade de materiais - Quebra-mar da Aguda, Gaia (Irmãos Cavaco, SA).



Figura 46 - Quebra-mar da Aguda em construção (Irmãos Cavaco, SA).

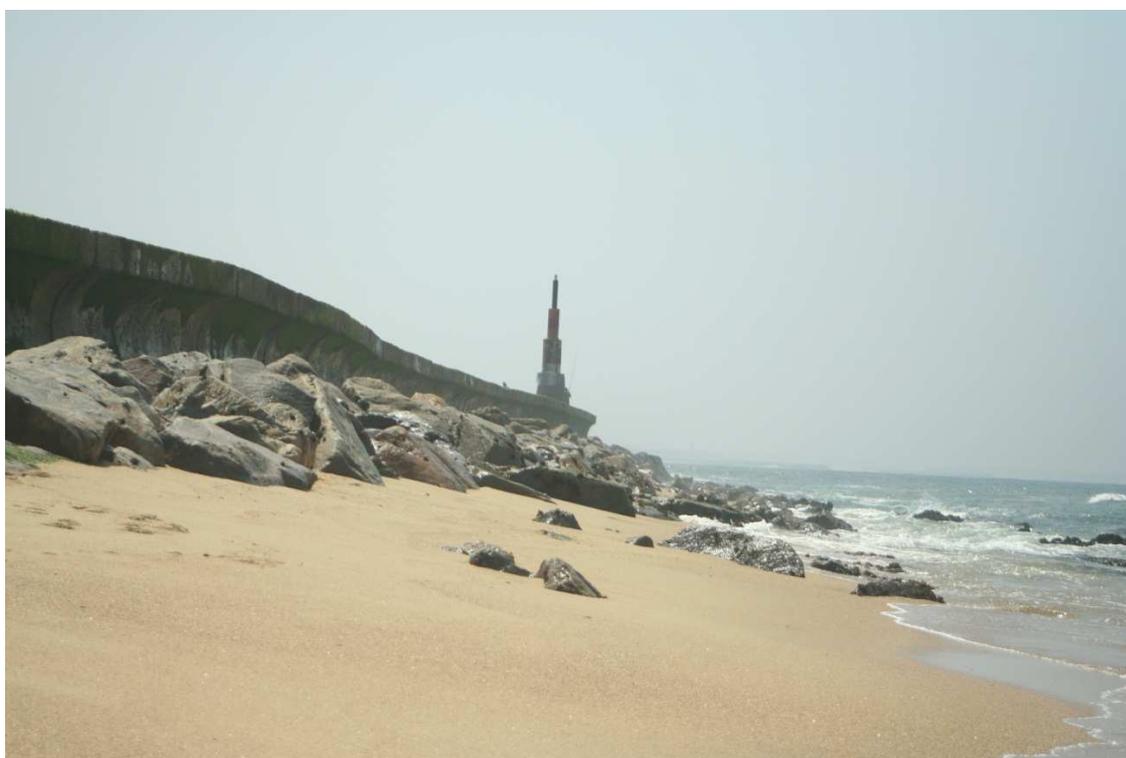


Figura 47 - Parte frontal do quebra-mar da Aguda (Nuno Vasconcelos, 2012).

Na Avenida Marginal da Foz do Douro, em frente à Cantareira, procedeu-se à proteção marginal e arranjo da zona de Cantareira/Sobreiras. Numa zona que muito bastante da proteção dos molhes na foz do rio Douro, realizaram-se bastantes trabalhos de reabilitação no conjunto dos quais constam a rede de drenagem de águas pluviais, as infraestruturas elétricas, assim como diversas pavimentações.

Principais Quantidades	
Aterro:	100.000 m ³
TOT:	6.500 m³
Enrocamento de 5 a 20 KN:	3.200 m³
Betão:	1.600 m ³
Área ajardinada:	5.300 m ²
Pavimentos em Slurry Seal:	8.000 m ²
Pavimentos em cubo de granito:	6.000 m ²

Tabela 6 - Quantidade de materiais - Avenida da Foz do Douro (Irmãos Cavaco, SA).



Figura 48 - Marginal da Cantareira em construção (Irmãos Cavaco, SA).



Figura 49 - Marginal da Cantareira, Foz do Douro (Nuno Vasconcelos, 2012).

Capítulo 3

Escolha de Enrocamento para as Obras de Proteção Costeira

Os Enrocamentos [figura 50] são o elemento mais utilizado nas obras de proteção costeira e estão presentes em praticamente todas as obras dessa natureza, sendo algumas exclusivamente constituídas por enrocamento.



Figura 50 - Enrocamentos utilizados na margem norte dos molhes da Foz do rio Douro (Nuno Vasconcelos, 2012).

Embora, ao longo dos anos, se tenham desenvolvido materiais especiais e específicos para as obras de proteção, como é caso dos tretápodes em betão

colocados em diversos tipos de obras, os enrocamentos continuam a ser geralmente os constituintes maioritários nas obras costeiras, devido ao seu preço, quantidade e rapidez de produção face aos outros materiais que são utilizados geralmente em zonas específicas da obra, se a sua utilização for considerada uma mais valia. Neste capítulo irão ser abordadas as propriedades dos enrocamentos, o tipo de pedreiras ou zonas de pedreiras a seleccionar para produção do enrocamento pretendido e os ensaios de caracterização dos enrocamentos.

3.1 Propriedades dos Enrocamentos

Os enrocamentos destinados à proteção costeira (enrocamentos marítimos) são designados por enrocamentos de proteção.



Figura 51 - Os enrocamentos dos esporões estão sujeitos ao desgaste das fortes ondulações durante as tempestades de Inverno - Esporão de Cortegaça, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).

Estes enrocamentos vão estar sujeitos a processos mecânicos que vão causar degradação, devido à agitação das águas, levando em muitos casos a uma alteração significativa que pode resultar num subdimensionamento da estrutura de proteção costeira. Nos enrocamentos sujeitos à agitação da água do mar, é fundamental que os tamanhos dos blocos estejam dimensionados adequadamente para as condições de agitação marítima no local.

Naturalmente, para um dimensionamento adequado é necessário que os blocos sejam de boa qualidade. Para isso é imprescindível que os enrocamentos resultem do desmonte de rocha de boa qualidade, ou seja, com alta densidade, baixa porosidade e alta resistência. A previsão do comportamento do enrocamento pressupõe então a análise de certas características importantes, como é o caso da permeabilidade, da resistência mecânica e da deformabilidade. No caso dos enrocamentos o estudo da permeabilidade, normalmente muito elevada, pode considerar-se secundário relativamente à resistência e deformabilidade. Através de ensaios “in-situ” e em laboratório, é possível determinar parâmetros que vão ser determinantes quer na aceitação do enrocamento a ser utilizado numa obra, quer na seleção das pedreiras e na previsão de fragmentação resultante de um desmonte.

3.2 Seleção de Pedreiras

A natureza das rochas é um fator importante quando selecionamos uma pedreira com a função de produzir enrocamento. Embora o enrocamento, embora possa ser produzido a partir de rochas de variadas naturezas, existem rochas mais adequadas do que outras principalmente para obtenção do enrocamento a utilizar nas obras costeiras, enrocamento este que vai estar sujeito a condições muito agressivas de agitação marítima e de salinidade.

Por exemplo, as rochas de natureza sedimentar em geral não são adequadas na utilização como enrocamento nas obras costeiras visto serem rochas que se degradam mais ou menos facilmente, são quimicamente ativas

e sensíveis à presença de água; para além do mais, na maioria dos casos não obedecem a parâmetros mínimos de abrasão, absorção de água e desgaste.

As rochas ígneas ácidas, de que é exemplo o granito, quando sãs, são geralmente rochas de eleição para a produção de enrocamento devido à sua alta resistência a abrasão e ao desgaste sendo um tipo de rocha bastante estável quimicamente. Nos maciços granitos, é frequente a ocorrência tanto de rocha sã como de rocha em vários estados de alteração, desde pouco alterada até rocha decomposta. O comportamento da rocha é comandado pelo seu estado de alteração, que vai influenciar a fissuração do maciço; e a presença de minerais argilosos resultantes de alterações nas rochas vai influenciar a sua maior alteração quando em contato com a água. Devido às suas qualidades, os enrocamentos provenientes de rochas graníticas são os mais utilizados em obras de proteção costeira em Portugal [figura 52].



Figura 52 - Paredão de enrocamento de natureza granítica - Cortegaça, Esmoriz (Nuno Vasconcelos, 2012).

Dentro das rochas ígneas básicas incluem-se rochas como gabros dioritos e basaltos. Embora estas rochas, quando perfeitamente sãs, sejam das mais resistentes e estáveis que se conhecem, com porosidades e permeabilidades extremamente baixas e fissuração muito reduzida, podem perder estas características quando apresentam alguma alteração (mesmo sendo essa alteração ligeira). Estas grandes diferenças de comportamento entre rochas perfeitamente sãs e rochas com ligeiras alterações tornam este segundo tipo de rochas perigosas sendo necessário estudá-las com grande cuidado. No

estudo destas rochas é fundamental detectar a presença de materiais argilosos, devido à sua expansão quando em contato com a água (provocando desagregações rápidas e violentas), e analisar estado de alteração global da rocha.

A utilização de rochas de natureza metamórfica fica condicionada principalmente por duas características, para além dos parâmetros normais de aceitação a que os enrocamentos têm que obedecer. A primeira é a composição mineralógica da rocha e conseqüentemente a sua natureza antes de ser metamorfizada. Compreende-se que uma rocha metamórfica como um gnaiss (metamorfizado a partir de um granito) em princípio tenha qualidades e composições mineralógicas melhores do que as de um xisto. A outra característica importante é o grau de alteração em que a rocha se encontra.

Na seleção de uma pedreira, a natureza da rocha e o seu estado não vêm a ser as únicas condicionantes para a sua escolha com vista à produção de enrocamento para uma obra. A distância da pedreira à obra e a maior facilidade ou dificuldade de transporte do enrocamento são fatores que por vezes, tanto por razões económicas, como em alguns casos, por impossibilidades práticas, se sobrepõem à escolha do melhor tipo de rocha para produzir o enrocamento. Por exemplo, embora a maior parte dos enrocamentos marítimos em Portugal continental seja de rocha granítica de boa qualidade, nas ilhas (Açores e Madeira) recorre-se à utilização de basaltos devido a não existirem alternativas [figura 53].



Figura 53 - Utilização de enrocamento basáltico num molhe em Vila Franca do Campo - Ilha de S. Miguel, Açores.

Além da seleção da pedra, também é importante escolher a zona da pedra a explorar consoante o tamanho de enrocamento que se quer obter.



Figura 54 - Imagem das bancadas de desmonte de uma pedra - Pedreira da Madalena, Gaia.

Para essa escolha, o conhecimento do nível de fraturação nas diferentes zonas da pedra é fundamental, visto que nunca iremos obter fragmentos resultantes de um desmonte maiores do que o espaço entre fraturas. Para isso, poderá recorrer-se à interpretação de uma rede de fraturas (caso esta exista) ou, se necessário, fazer-se um estudo para conhecer a rede de fraturas de uma pedra.

Um problema que pode surgir, quando selecionamos uma pedra para produção de enrocamento que antes da produção deste estivesse direcionada para a produção de granulometrias mais finas, é o problema da microfissuração resultante do desmonte destinado a granulometrias mais finas

em que são utilizadas cargas explosivas específicas maiores. Um procedimento que pode ser vantajoso para contornar este problema consiste em começar a fazer os desmontes para as granulometrias utilizadas nas obras costeiras das mais finas para as mais grossas, ou seja, organizar os desmontes para os TOT e enrocamentos menores nas zonas superficiais e depois proceder ao desmonte para os enrocamentos maiores nas zonas que não estavam à superfície e se encontram mais sãs, devido à utilização de cargas explosivas específicas progressivamente menores à medida que se quer obter granulometria maior [figura 55].

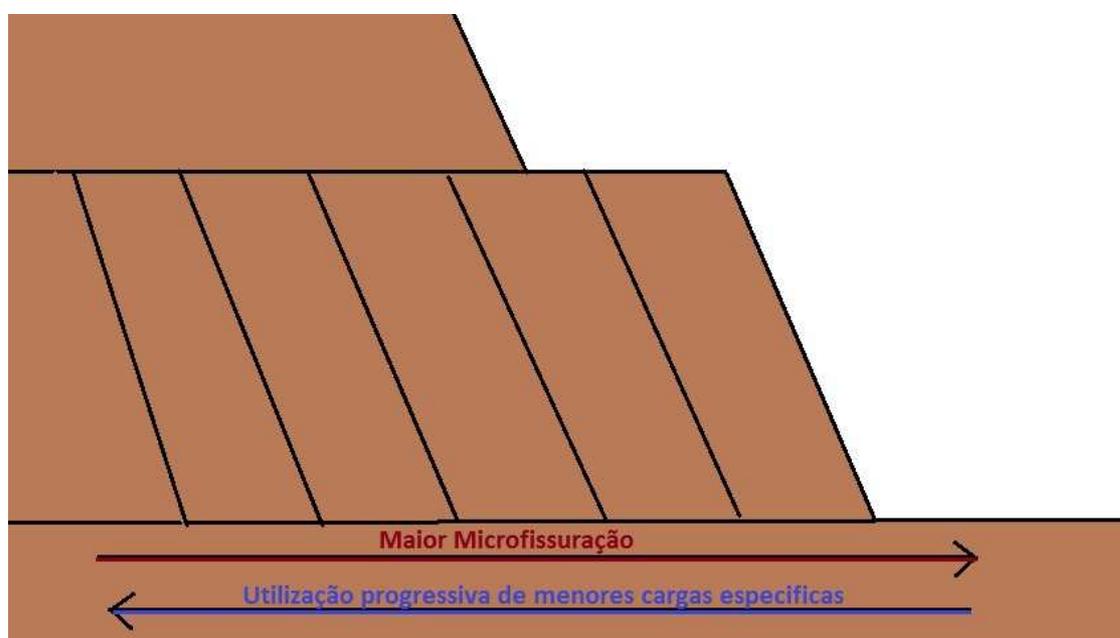


Figura 55 - Diminuição progressiva da microfissuração com a utilização progressiva de menor carga específica.

3.3 Ensaios de Caracterização Laboratorial de Enrocamentos

Para a seleção de um maciço rochoso para produção de enrocamento, é necessário executar ensaios com vista à obtenção de parâmetros e índices de resistência. Para além dos índices de resistência de um maciço, a determinação destes outros parâmetros facilita-nos a previsão granulométrica de um desmonte através da determinação de mais elementos para a obtenção

do fator rocha. Os ensaios para determinação do índice de resistência (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1978) são ensaios de abrasão tipo Los Angeles [figura 56], ensaios de absorção de água e ensaios de desgaste acelerado.



Figura 56 - Máquina Los Angeles (Engenharia Concursos, 2011)

O ensaio de abrasão Los Angeles (NP EN 1097-2 2011) consiste em obter certa quantidade de agregado, cinco ou dez quilos, satisfazendo a determinada granulometria, submetendo-a a choques e desgastes durante a rotação de um tambor metálico de 711 milímetros de diâmetro interior a uma velocidade de 31 a 33 RPM. O efeito é intensificado pela presença de onze bolas de aço e o ensaio é concluído após 500 rotações. Posteriormente, o material é peneirado e o desgaste vem aferido pela razão entre a quantidade de material que passou na peneira de 1,6 mm após o ensaio e a quantidade total colocada inicialmente no tambor. O índice de absorção de água é o índice, em percentagem, da absorção de água após 24 horas de imersão do material em água doce. O desgaste acelerado é o resultado da fragmentação

da rocha submetida à ação de sulfato de sódio em cinco ciclos de imersão e secagem em forno determinando-se, percentualmente, o peso da rocha que se fragmenta.

Para sua aceitação, os enrocamentos destinados a uma obra marítima têm que cumprir certas especificações de modo a que se possa garantir que estes cumprem a função desejada. Para isso são efetuados inúmeros ensaios em que se estipulem valores mínimos a serem cumpridos, o que é exigido por um caderno de encargos específico para a obra [tabela 7].

RESULTADO DOS ENSAIOS								
VALORES DE REFERÊNCIA DAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CADERNO DE ENCARGOS	Nº Pº Lº - 37/04-07	Nº Pº Lº - 37/04-08	Nº Pº Lº - 37/04-09	Nº Pº Lº - 37/04-10	Nº Pº Lº - 37/04-11	Nº Pº Lº - 37/04-12	Nº Pº Lº - 37/04-13	
DATA	07-02-2005	14-02-2005	16-02-2005	18-02-2005	14-03-2005	14-03-2005	18-03-2005	
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASONS NO BLOCO (m/s)	–						4 689 a 5000 m/s	
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASONS NOS PROJETOS (m/s)	–							
MASSA VOLUMICA DO MATERIAL IMPERMEAVEL (Kg/m ³)	–	2 652 a 2 663 Kg/m ³	2 666 a 2 680 Kg/m ³	2 666 a 2 665 Kg/m ³	2 675 a 2 680 Kg/m ³	2 653 a 2 679 Kg/m ³	2 667 a 2 667 Kg/m ³	2 631 Kg/m ³
MASSA VOLUMICA DO MATERIAL SATURADO	2400 Kg/m ³	2 647 a 2 660 Kg/m ³	2 656 a 2 665 Kg/m ³	2 659 a 2 671 Kg/m ³	2 663 a 2 671 Kg/m ³	2 641 a 2 656 Kg/m ³	2 634 a 2 656 Kg/m ³	2 515 Kg/m ³
MASSA VOLUMICA APARENTE DO MATERIAL SECO (Kg/m ³)	–	2 644 a 2 672 Kg/m ³	2 646 a 2 655 Kg/m ³	2 656 a 2 663 Kg/m ³	2 665 a 2 668 Kg/m ³	2 635 a 2 645 Kg/m ³	2 610 a 2 641 Kg/m ³	2 443 Kg/m ³
ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 24 HORAS EM ÁGUA DOCE (%)	–	0,10 a 0,12 %	0,24 a 0,44 %	0,16 a 0,19 %	0,10 a 0,32 %	0,2 a 0,26 %	0,33 a 0,52 %	2,39%
ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 30 DIAS EM ÁGUA SALGADA	< 4%	0,27 a 0,31 %	0,46 a 0,42 %	0,31 a 0,34 %	0,38 a 0,45 %	0,43 %	0,61 a 0,60 %	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL NO ESTADO SECO - TENSÃO DE ROTURA (Mpa)	–	77 a 106 Mpa	34 a 84 Mpa	37 a 98 Mpa	57 a 101 Mpa	32 a 57 Mpa	83 a 98 Mpa	81 Mpa
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL APÓS IMERSÃO 24 HORAS EM ÁGUA DOCE - TENSÃO DE ROTURA (Mpa)	–	76 a 76 Mpa	35 a 69 Mpa	44 a 57 Mpa	84 a 111 Mpa	54 a 56 Mpa	80 a 105 Mpa	32 Mpa
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL APÓS IMERSÃO 30 DIAS EM ÁGUA SALGADA - TENSÃO DE ROTURA	> 40 Mpa	52 a 93 Mpa	35 a 45 Mpa	43 a 61 Mpa	61 a 71 Mpa	63 Mpa	52 a 84 Mpa	
ALTERAÇÃO APÓS 30 DIAS DE IMERSÃO EM ÁGUA SALGADA (SIM/NÃO)	–	Não	Não	Não	Não	Não	Não	

OBSERVAÇÕES:  - VALORES = ou > QUE O EXIGIDO NO CADERNO DE ENCARGOS
 - VALORES < QUE O EXIGIDO NO CADERNO DE ENCARGOS
 - VALORES NÃO EXIGIDOS NO CADERNO DE ENCARGOS

Tabela 7 - Empreitada de reparação dos esporões e das obras aderentes da Costa da Caparica e da Cova do Vapor (Instituto da Água, 2004/2005).

Entre os ensaios realizados de caracterização laboratorial para enrocamento marítimo, os ensaios mais importantes são a determinação da massa volúmica do material saturado, o índice de adsorção de água após 30 dias em água salgada e a resistência à compressão uniaxial após imersão de 30 dias em água salgada (tensão de ruptura).

Capítulo 4

Produção de Enrocamentos

Neste capítulo irá ser abordada a produção de enrocamento desde a produção de blocos de enrocamento para as dimensões pretendidas até à produção de subprodutos, passando pelos diagramas de fogo e por um modelo de previsão do tamanho dos fragmentos resultantes, procurando averiguar de que maneira é que os parâmetros escolhidos num diagrama de fogo influenciam o tamanho dos fragmentos.

4.1 Produção de Blocos de Dimensão/Peso Adequado às Obras de Proteção Costeira

Quando o objetivo é produzir material para enrocamento, os desmontes têm que ser projetados para produzir granulometrias grosseiras. Na estrutura das obras de proteção costeira são utilizadas diferentes gamas granulométricas para diferentes densidades de rochas, sendo estas agrupadas em diferentes classes de peso usualmente expresso em Tf (tonelada força) ou em KN (quilo-Newton).

As gamas de enrocamento menor são usualmente agrupadas na classe de enrocamento TOT. Esta classe de enrocamento (todo o tamanho) engloba

normalmente as gamas de pesos inferiores as 10 kN (aproximadamente uma Tf). Embora muitas vezes possam ser utilizadas todas as granulometrias inferiores, em certos casos granulometrias muito finas podem ter que ser excluídas da gama de enrocamento TOT devido aos problemas que podem criar nos núcleos das obras marítimas (local onde usualmente esta gama de enrocamento é utilizado) devido a sua baixa permeabilidade e à possibilidade de transporte associado ao seu baixo peso. Geralmente, as gamas de enrocamento agrupam-se nas seguintes categorias:

- Enrocamento TOT (todo-o-tamanho) < 10 kN (\approx 1 tf)
- Enrocamento 10 - 20 kN (\approx 1 - 2 tf)
- Enrocamento 20 - 40 kN (\approx 2 - 4 tf)
- Enrocamento 40 - 60 kN (\approx 4 - 6 tf)
- Enrocamento 60 - 90 kN (\approx 6 - 9 tf)
- Enrocamento 90 - 120 kN (\approx 9 - 12 tf)
- Enrocamento 120 - 150 kN (\approx 12 - 15 tf)
- Enrocamento > 150 kN (\approx 15 tf)

No entanto, poderão ser formados novo grupos de peso de enrocamentos (se assim for necessário) e até ser criada uma classe de enrocamento de peso inferior a 10 kN remetendo a gama de enrocamento TOT para valores de peso mais baixos.

Os finos que nem como TOT possam ser utilizados são considerados como subprodutos. No entanto os finos podem servir como outros produtos, nomeadamente na maioria das pedreiras que não tem como única função a produção de enrocamento, podendo deste modo evitar-se, em muitos casos, a utilização de britadores, visto que os finos já estão nas granulometrias desejadas e os elementos grosseiros são utilizados como TOT e enrocamento mais graúdo.

4.2 Pegas de Fogo Adequadas para a Produção de Enrocamentos

As pegas de fogo adequadas à produção de enrocamento são pegas de fogo a céu aberto concebidas para desmontar maciços duros, densos e pouco fraturados de modo a conseguir obter as granulometrias adequadas. O desmonte a céu aberto tem como principal característica (diferenciando-se de outro tipo de explorações nomeadamente as de interior) a de ser efetuado por bancadas. As bancadas vão ser dimensionadas consoante o produto que se quer obter, de modo a que haja o melhor plano de ataque e de fogo para uma maior rapidez nos serviços, produção diária e economia. Embora não exista um limite quanto ao número de furos a executar nem quanto a altura da bancada, sabe-se que quanto mais altas as bancadas forem mais perigosas são e mais difíceis vão ser as perfurações.

Os fatores mais importantes para a realização de uma pega de fogo são:

- Diâmetro do furo (d)
- Comprimento do furo (H_1)
- Subfuração (SF)
- Inclinação do furo (α)
- Afastamento (V)
- Espaçamento (E)
- Carga de um furo (H_1)
- Comprimento da Carga de Fundo ($H.C.F$)
- Comprimento da Carga Coluna ($H.C.C$)
- Tamponamento (T)
- Consumo específico (C_e)

Estes fatores são caracterizados, segundo o “Manual de Explosivos e Suas Utilizações” (Sociedade Portuguesa de Explosivos, 1994), da seguinte forma:

Diâmetro do furo (d)

O diâmetro do furo está condicionado pelo tipo de equipamento disponível, caso exista. Se não existir escolhe-se o diâmetro pretendido e adquire-se o equipamento necessário. Na prática, o diâmetro está relacionado com a altura da bancada e assim temos que, quanto maior o diâmetro do furo, mais alta poderá ser a bancada. Geralmente os diâmetros mais usados são os que vão desde 2 polegadas até 4 polegadas ($\approx 50-100$ mm).

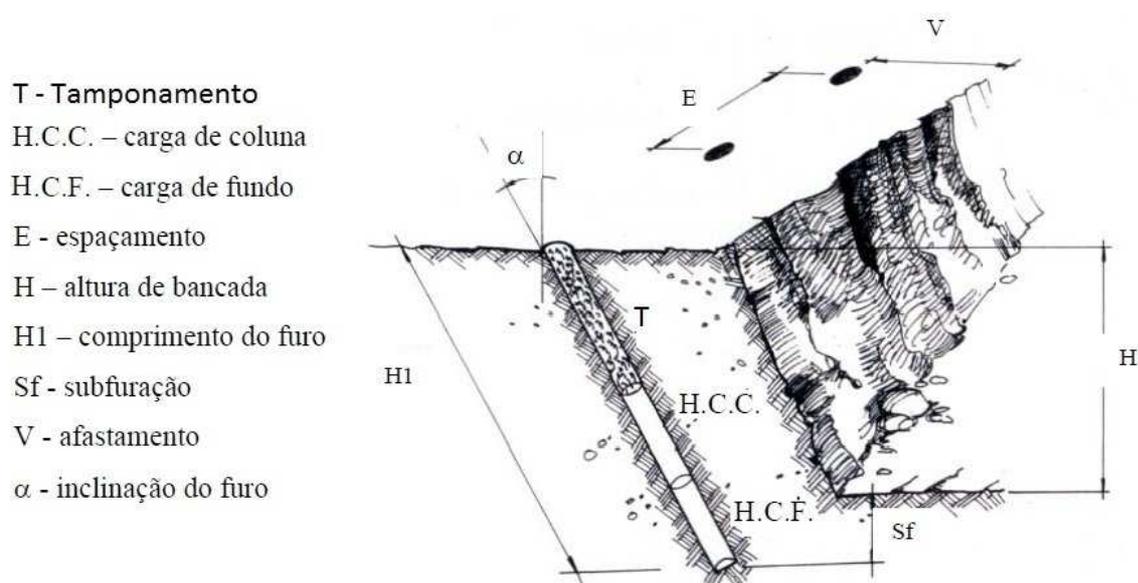


Figura 57 - Desenho de furação e carga de uma pega de fogo a céu aberto (Sociedade Portuguesa de Explosivos, 1994).

Comprimento do furo (H1)

Uma vez fixado o diâmetro do furo, passa-se a dimensionar a altura mais adequada para o diâmetro escolhido e para as condições existentes. Como foi dito anteriormente, não são aconselháveis bancadas muito altas. Assim sendo, e se o furo for vertical, a altura do furo é dado pela seguinte expressão:

$$H1 = H + 0,3 \times V$$

Em que H_1 é o comprimento final do furo, H é a altura da bancada e $0,3 \times V$ é a subfuração, sendo V o afastamento do furo à frente da bancada.

Subfuração (Sf)

A execução da subfuração melhora o desempenho da pega. No caso de não ser feita a subfuração, a base da bancada não será arrancada segundo um ângulo de 90 graus, não permitindo que esta fique horizontal, originando por isso um repé. Este repé necessita de ser retirado, precisando para tal que se faça nova pega de fogo, o que encarece os trabalhos.

$$Sf = 0,3 \times V$$

Se o valor da subfuração for superior a $0,3 \times V$, aumenta o consumo de explosivo e não se obtém grandes vantagens.

Inclinação do furo (a)

Atualmente o hábito de fazer furos verticais em bancadas tende a diminuir, excepto em casos particulares, tais como a obtenção de blocos de rochas, etc. A execução de furos inclinados apresenta algumas vantagens, sendo de salientar:

- bancadas mais seguras
- melhor fragmentação da rocha
- maior produção da rocha
- diminuição do consumo de explosivo
- maiores afastamentos e espaçamentos entre furos
- eliminação dos repés
- menores vibrações

As inclinações variam de local para local, podendo estar entre 10 e 30 graus, sendo os valores mais usuais compreendidos entre $18^\circ 30'$ e $26^\circ 30'$.

Com inclinação, a determinação do comprimento total do furo passaria a ser feita através da seguinte expressão:

$$H1 = (H/\cos a) + 0,3 \times V$$

Sendo a - o ângulo que o furo faz com a vertical.

Afastamento (V)

Entende-se por afastamento a distância que vai do furo à frente da bancada, ou entre linhas de furos. Este afastamento é calculado através da seguinte expressão:

$$V_{max} = 45 \times d, \text{ sendo } d \text{ o diâmetro do furo, expresso em mm}$$

Na prática este valor de V_{max} deve ser ajustado uma vez que a precisão na furação pode apresentar alterações (desvios). Estes desvios devem ser avaliados, passando o afastamento a ter o valor correspondente a:

$$\text{Afastamento prático: } V1 = 85\% V_{max} \quad \text{ou} \quad V1 = 0,85 \times V_{max}$$

Por vezes também se utiliza a fórmula:

$$V = d,$$

em que V está em metros e d em polegadas.

Espaçamento (E)

Espaçamento é a distância que existe entre dois furos consecutivos da mesma fiada. Um espaçamento que geralmente permite bons resultados de fragmentação e arrancamento da rocha é dado pela expressão:

$$E = 1,3 \times V$$

Através da variação do espaçamento (E) e do afastamento (V) pode-se variar o tipo de fragmentação, assim:

- Se aumentar E e diminuir V , a rocha ficará mais fragmentada logo com blocos de menor dimensão.

- Se diminuir E e aumentar V , a rocha ficará menos fragmentada, logo com blocos de maior dimensão

Carga de um furo (CF)

A carga de um furo é composta na maior parte dos casos por carga de fundo (HCF) e carga de coluna (HCC). A sua distribuição ao longo do furo não deve ser uniforme. Assim o comprimento correspondente à carga de fundo é dado por:

$$HCF = 1,3 \times V$$

O comprimento carga de coluna é dada por:

$$HCC = H1 - (T + HCF)$$

O restante do furo é para tamponamento.

Tamponamento (T)

O tamponamento pode ser considerado como o fechar do furo. Este tem um comprimento semelhante ao valor do afastamento e deve ser feito com material de granulometria fina (argila, areia, pó da furação, etc.) ou com dispositivos destinadas a executar essa função. O tamponamento não deve ultrapassar o valor do afastamento prático, pois pode originar blocos de grandes dimensões, vindos da parte superior da bancada. Não se deve adoptar

um valor muito inferior, porque há possibilidade dos gases da explosão se escaparem por aí e provocarem projeções.

Consumo volumico específico (Ce)

O consumo volumico específico pode definir-se como a razão peso de explosivo utilizado na pega de fogo e o volume total de rocha desmontada. Usualmente este cálculo é simplificado e efetuado unicamente utilizando como referência o peso do explosivo utilizado num furo e volume de rocha que esse furo desmonta. Assim temos:

$$Ce = (H.C.C + H.C.F) / (E \times V \times H)$$

É habitualmente exprimir o valor do Ce em g/m³.

É importante salientar que quanto menor for a carga específica maior serão os fragmentos, ou seja, a dimensão dos blocos. No entanto é preciso ter cuidado para que a carga específica não seja muito baixa porque se isso acontecer pode originar um mau arranque de rocha e um corte imperfeito da bancada. Para um bom arrancamento de rocha não devemos ter uma carga específica mássica inferior a 60 g/ton. Para obter a carga específica mássica ou o consumo ponderal específico devemos dividir a carga específica (volúmica) pela densidade da rocha expressa em (ton/m³).

$$Ce_{(volúmico)} (g/m^3) / d (ton/m^3) = Ce_{(mássica)} (g/ton)$$

4.3 Análise de Fragmentação e Estimativa da Distribuição do Tamanho dos Fragmentos

Para a análise de fragmentação e estimativa da distribuição optou-se pela utilização do modelo fragmentação designado “Kuz-Ram Model”. Este modelo foi escolhido visto ter a capacidade de, para além de permitir a previsão do tamanho médio dos fragmentos, fornecer uma curva granulométrica da distribuição dos fragmentos, proporcionando assim um óptimo auxílio à previsão de uma fragmentação, quando combinado com os fatores fundamentais de uma pega de fogo, com as qualidades do maciço rochoso e com as especificações dos explosivos a utilizar. O modelo Kuz-Ram baseia-se em cinco equações que, quando combinadas, conduzem à obtenção de uma curva granulométrica. As cinco equações são as seguintes (Morais & Gripp, 2004):

Equação de Kuznetsov

Uma correlação entre o tamanho médio do fragmento e a energia de detonação aplicada por unidade de volume de rocha (razão de carga) foi desenvolvida por Kuznetsov (1973) como uma função do tipo de rocha. Essa equação foi modificada por Cunningham (1983), tendo a seguinte forma:

$$X_{50} = FR \times K^{-0,80} \times Q_e^{0,167} \times \left(\frac{115}{E_r}\right)^{0,633}$$

onde:

X₅₀ é o tamanho médio de partícula (cm).

FR é o fator da rocha.

K é a razão de carga (kg/m³).

Q_e é a massa do explosivo utilizado (kg).

E_r representa a energia Energia Especifica Relativa (RWS) do explosivo referida ao ANFO (ANFO=100).

Equação de Rosin-Rammler:

A distribuição do tamanho dos fragmentos é calculada pela equação de Rosin-Rammler:

$$P = 100 \times \left[1 - e^{-0,693 \times \left(\frac{X}{X_{50}} \right)^n} \right]$$

Onde:

X é o tamanho da malha do peneiro.

X₅₀ é o tamanho médio de partícula,

n é o índice de uniformidade.

P é o percentual de material passante no peneiro de tamanho X.

Índice de uniformidade de Cunningham:

Essa expressão foi desenvolvida através de testes de campo por Cunningham (1987). Ela correlaciona todos os parâmetros geométricos do plano de fogo, como segue:

$$n = \left[2,2 - 14 \times \left(\frac{V}{d} \right) \right] \times \left[\frac{(1 + E/V)}{2} \right]^{0,5} \times \left\{ \left(1 - \frac{W}{V} \right) \times \left[\text{abs} \left(\frac{(HCF - HCC)}{L} \right) + 0,1 \right]^{0,1} \times \left(\frac{L}{H} \right) \right\}$$

Onde:

V é o afastamento (m).

E é o espaçamento (m).

d é o diâmetro do furo (mm).

W é o erro de perfuração(m).

L é o comprimento total de carga (m).

H é a altura do banco (m).

HCF é o comprimento da carga de fundo (m).

HCC é o comprimento da carga de coluna (m).

abs é o valor absoluto referente a (BCL-CCL)/L.

Sendo o erro de perfuração W calculado pela seguinte expressão:

$$W (m) = 0,05 + 0,03 H1 (m)$$

Equação de Tidman:

A energia do explosivo é calculada a partir da equação desenvolvida por Tidman:

$$E_r = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 \times RWS$$

Onde:

E_r é a energia relativa por massa efetiva do explosivo.

VOD_e é a velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo).

VOD_n é a velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s).

RWS representa a energia relativa por massa referida ao ANFO.

Fator da rocha:

O fator da rocha (FR) foi originalmente desenvolvido por Lilly (1986) e modificada por Cunningham (1987). Para determinação desse fator são usados dados extraídos da seguinte tabela [tabela 8], a qual considera o tipo de rocha, direção e mergulho das descontinuidades com relação à frente livre do desmonte. O fator da rocha é usado para ajudar a prever o tamanho médio dos fragmentos do modelo e é obtido por:

$$FR = 0,06 \times (RMD + JF + RDI + HF)$$

Símb.	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Maciço rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Oversize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção e mergulho com relação à face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm ³)	RDI = 25d - 50	
HF	se E < 50 GPa se E > 50 GPa	HF = E/3	
		HF = UCS/5	
E	Módulo de Young (GPa)		
UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)		

Tabela 8 - Classificação geomecânica para obtenção do fator da rocha (Morais & Gripp, 2004).

A partir das equações do modelo Kuz-Ram e dos parâmetros fundamentais para o dimensionamento de pegadas de fogo a céu aberto, foi desenvolvido um programa (em Excel) que permite, juntamente com os dados de um certo maciço rochoso e dos explosivos, prever a fraturação de um desmonte com o objetivo de produzir enrocamento. Através dos dados do dimensionamento da pega de fogo, dados da rocha e dos dados dos explosivos, é possível chegar ao tamanho médio dos fragmentos e a uma curva de distribuição granulométrica (como se irá demonstrar no capítulo seguinte). No entanto os enrocamentos usualmente são classificados em classes de peso; por isso começou-se por fazer a conversão dos tamanhos dos fragmentos em volumes, através da aproximação à forma de blocos cúbicos e posterior conversão em peso através da densidade do maciço rochoso. Para isso utilizaram-se as fórmulas:

Para o cálculo do volume em m³:

$$V(m^3) = \left(\frac{X(cm)}{100 (cm/m)} \right)^3$$

E para o cálculo do peso em kN:

$$P(kN) = V(m^3) \times d(ton/m^3) \times g(m/s^2),$$

em que $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Posteriormente optou-se pela criação de um gráfico de barras em que se incluíssem as gamas de peso dos enrocamentos. Para isso foi necessário que a partir dos valores obtidos dos tamanhos de fragmentação (cumulante) se fizesse a conversão para pesos e depois se obtivesse o valor percentual dessa gama de enrocamento, através da subtração desses intervalos à cumulante percentual. As gamas de peso escolhidas para o efeito foram:

Finos	< 0,5 kN
TOT	0,5-10 kN
ENR	10-20 kN
ENR	20-40 kN
ENR	40-60 kN
ENR	60-90 kN
ENR	120-150 kN
ENR	150-180 kN
ENR	> 180 kN

Os finos poderão ou não englobar a classe de TOT.

Os parâmetros a manipular no dimensionamento da bancada são:

- d - diâmetro dos furos (mm) $\rightarrow (d_{\min}(\text{mm}) = V(\text{m})/45 \times 1000)$
- V - Afastamento (m)
- E - Espaçamento (m)
- H - Altura da bancada (m)
- α - Inclinação do furo ($^{\circ}$)

- Tamponamento (m)
- C.C.C - Concentração carga de coluna (kg/m)
- C.C.F - Concentração carga de fundo (kg/m)
- Escolha de explosivos apropriados para carga de fundo e coluna

É necessário introduzir valores referentes à rocha para o cálculo do fator rocha.

Os outros valores serão calculados automaticamente pelo programa, respeitando tanto as formulas de dimensionamento das pegas de fogo (ver subcapitulo 4.2) como as formulas do Modelo Kuz-Ram. No entanto terão que ser respeitadas certas condições nos “*inputs*” para que não se faça um dimensionamento desadequado. As condições são as seguintes:

- d_{\min} - diâmetro mínimo dos furos (mm) = $V(m)/45 \times 1000(mm/m)$
- E - Espaçamento (m) -> (entre V e 1,3 V)
- α - Inclinação do furo -> (entre 10 e 30°)
- A carga específica (calculada a partir das concentrações de carga de coluna e fundo) não deve ser inferior a 60 g/ton

4.4 Exemplos de Aplicação do Modelo de Análise de Fragmentação para a Produção de Enrocamento e Previsão de Subprodutos

Neste subcapítulo vai proceder-se à demonstração do programa feito em *Excel* para um determinado tipo de rocha tentando obter simultaneamente blocos de enrocamento de várias dimensões um bom arrancamento de rocha e bom corte na bancada.

Dados da Rocha:

- Granito
- RQD = 90-100%
- Maciço rochoso muito pouco fraturado
- densidade -> $d = 2,75 \text{ g/cm}^3$
- Modulo de Young -> $E = 51 \text{ GPa}$
- Resistência à compressão axial -> $USF = 150 \text{ MPa}$

Dados da pega de fogo:

- diâmetro do furo -> $d = 70 \text{ (mm)}$
- Afastamento -> $V = 3 \text{ (m)}$
- Espaçamento -> $E = 3,9 \text{ (m)}$
- Altura da bancada -> $H = 12 \text{ (m)}$
- Inclinação do furo -> 20°
- Concentração linear carga de fundo -> $3,3 \text{ (Kg/m)}$
- Concentração linear carga de coluna -> $1,65 \text{ (Kg/m)}$

Explosivos Utilizados:

- Carga de fundo -> Riodin (Dinamite Gelatinosa)
- Carga de coluna -> Riogel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna)

Os dados da pega de fogo devem ser inseridos nas células a branco [figura 58]. Embora não seja a função principal do programa, este também calcula o número de furos e o volume total de rocha desmontada caso seja inserido o comprimento da bancada.

DADOS:			
Tipo de Rocha:	Granito	ρ :	<input type="text" value="2,75"/> g/cm ³
Tipo de Maciço:	Compacto	RQD:	<input type="text" value="90-100"/> (%)
Diâmetro mínimo	67 (mm)		2,62 (in)
Diâmetro do Furo:	<input type="text" value="70"/> (mm)		2,76 (in)
Comprimento da Bancada:	<input type="text" value="50"/> (m)		
Numero de furos:	13 (furos)		
PARÂMETROS DE FURAÇÃO:			
V:	<input type="text" value="3,0"/> (m)	α :	<input type="text" value="20"/> (°)
E:	<input type="text" value="3,9"/> (m)	Sf:	0,9 (m)
H:	<input type="text" value="12,0"/> (m)	H1:	13,7 (m)
PARÂMETROS DE CARREGAMENTO:			
T:	<input type="text" value="3,0"/> (m)	TOTAL C.C.:	11,2 (Kg)
H.C.C.:	6,8 (m)	TOTAL C.F.:	12,9 (Kg)
H.C.F.:	3,9 (m)	TOTAL C.Furo:	24,0 (Kg)
TIPO DE EXPLOSIVO:			
Carga Coluna (C.C.):	<input type="text" value="Riogel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna)"/>		
Carga Fundo (C.F.):	<input type="text" value="Riodin (Dinamite Gelatinosa)"/>		
Concentração C.C.:	<input type="text" value="1,65"/> (Kg/m)	Consumo Especifico:	171 (g/m ³)
Concentração C.F.:	<input type="text" value="3,30"/> (Kg/m)	Consumo Especifico:	62 (g/ton)
VOLUMES DESMONTADOS:			
Vol. de Rocha Desmontada por furo:	140,4 (m ³ /furo)		
Vol. Total de Rocha Desmontada:	1684,8 (m ³)		

Figura 58 - Programa de Previsão de Fragmentação - Parâmetros da pega de fogo

Nota: As concentrações de carga de fundo e coluna forma escolhidas de forma a obter um consumo mássico específico perto de 60 g/ton, com vista a obter a menor fragmentação possível sem haver um mau arranque de rocha. No caso de o consumo específico ficar com um valor inferior a 60 g/ton, o programa lança um pequeno alerta por baixo da célula que contem o consumo específico mássico.

O fator da rocha é calculado através da inserção dos dados do maciço nas células [figura 59]. Visto ser um maciço de boa qualidade, o valor de RMD é igual a 50 sendo JF (JPS+JPA) um valor nulo. A célula HF é preenchida em função da opção entre o valor do módulo de Young ou da resistência à compressão uniaxial.

• **Fator da rocha:**

O fator da rocha é usado para ajustar o tamanho médio dos fragmentos do modelo e é obtido por:

$$FR = 0,06 \times (RMD + JF + RDI + HF)$$

Para determinação desse fator são usados os dados obtidos na classificação da Tabela

Simb.	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Maciço rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Oversize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção e mergulho com relação à face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm ³)	RDI = 25d - 50	
HF	se E < 50 GPa se E > 50 GPa	HF = E/3	
		HF = UCS/5	
E	Módulo de Young (GPa)		
UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)		

RMD:	50,00	(Friável = 10 / Maciço = 50)
JPS:	0,00	(Fraturado)
JPA:	0,00	
JF:	0,00	
ρ:	2,75	(g/cm ³)
RDI:	18,75	(g/cm ³)
E	51,00	(Gpa)
USF	150,00	(Mpa)
HF:	30,00	
FR:	5,93	

Figura 59 - Programa de Previsão de Fragmentação - Cálculo do fator rocha com o auxílio da tabela

Para o cálculo da Energia do explosivo [figura 60], é necessário consultar a especificações técnicas de cada explosivo.

• **Equação de Tidman:**

A energia do explosivo é calculada a partir da equação desenvolvida por Tidman:

$$Er = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 \times RWS$$

onde:

Er é a energia relativa por massa efetiva do explosivo.

VOD_e é a velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo).

VOD_n é a velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s).

RWS representa a energia relativa por massa comparada ao ANFO.

Carga de Coluna:	Riegel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna)	
VOD _e :	4000	(m/s)
VOD _n :	4000	(m/s)
RWS:	92	(%)
Er:	92	
Carga de Fundo:	Riodin (Dinamite Gelatinosa)	
VOD _e :	6000	(m/s)
VOD _n :	6000	(m/s)
RWS:	135	(%)
Er:	135	
Er(Carga de Fundo + Carga de Coluna):	115,02	

Figura 60 - Programa de Previsão de Fragmentação - Energia do explosivo

Neste caso, utilizámos para carga de fundo Riodin (Dinamite Gelatinosa) e para Carga de coluna Riegel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna). As características técnicas destes explosivos vêm indicadas nas seguintes figuras [figuras 61 e 62].

Características Técnicas (Valor Nominal)		Formatos (Valores Nominais)				
Densidade	1,45 g/cm ³	Diâmetro x Comp (mm)	Peso / Cart (gr)	Nºcart/caixa	Peso/Caixa (kg)	Tipo de Embalagem
Velocidade de detonação 1	6.000 m/s	26 x 200	152	165	25	cartucho de papel encerado
Calor de Explosão 2	4,1 MJ/kg	32 x 200	238	105	25	cartucho de papel encerado
(REE - WS) (ANFO=100%) _{3,3}	135%	40 x 400	714	35	25	cartucho de papel encerado
(REE - BS) (ANFO=100%) _{2,3}	244%	50 x 380	1042	24	25	cartucho de papel encerado
Volume de gases 2	895 l/kg	60 x 620	2500	10	25	Filme plástico (coex)
Gases Tóxicos 4	<2,27 l/100 g	70 x 500	2778	9	25	Filme plástico (coex)
		80 x 600	4167	6	25	Filme plástico (coex)
		90 x 570	5000	5	25	Filme plástico (coex)
		100 x 450	5000	5	25	Filme plástico (coex)

(1) D=60 mm. Os valores de VOD podem variar com as condições de iniciação, com o confinamento e com o diâmetro.
 (2) Todos os valores relativos à energia foram calculados usando o código W-DETCOM, desenvolvido pela MAXAM, para seu uso exclusivo. Utilizando outros programas, podem ser obtidos valores diferentes.
 (3) A energia efectiva relativa (REE) corresponde a um valor percentual, o qual compara a energia disponível do explosivo para realizar o trabalho efectivo de rebentamento até uma pressão de 100 MPa (pressão mínima de fragmentação da maioria dos tipos de rocha), com a energia efectiva análoga do ANFO.
 (4) De acordo com a Regulamentação Europeia (EN 13.631-16).

Outros formatos podem ser disponibilizados mediante solicitação do cliente

Figura 61 - Características Técnicas do explosivo Riodin (Maxam-Corp, 2009)

Características Técnicas (Valores nominais)		Formatos (Valores nominais)				
Densidade	1,10 g/cm ³	Diâmetro x Comp. (mm)	Peso/ cartucho (gr)	Nº cartuchos/caixa	Peso/caixa (kg)	Tipo de embalagem
Velocidade de detonação ¹	4.000 m/s	50 x 500	1087	23	25	Filme plástico (coex)
Calor de explosão ²	3,1 MJ/Kg	60 x 500	1563	16	25	Filme plástico (coex)
(REE - WS) (ANFO=100%) _{3,3}	92%	70 x 500	2273	11	25	Filme plástico (coex)
(REE - BS) (ANFO=100%) _{2,3}	127%	80 x 500	3125	8	25	Filme plástico (coex)
Volume Gases ²	914 l/kg					
Gases Tóxicos ⁴	< 3,5 l/100 g					

(1) D=65mm. Multiplicador. 5 °C. Os valores de VOD podem variar com as condições de iniciação, com o confinamento e com o diâmetro.
 (2) Todos os valores relativos à energia foram calculados usando o código W-DETCOM, desenvolvido pela MAXAM, para seu uso exclusivo. Utilizando outros programas, podem ser obtidos valores diferentes.
 (3) A energia efectiva relativa (REE) corresponde a um valor percentual, o qual compara a energia disponível do explosivo para realizar o trabalho efectivo de rebentamento até uma pressão de 100 MPa (pressão mínima de fragmentação da maioria dos tipos de rocha), com a energia efectiva análoga do ANFO.
 (4) De acordo com a Regulamentação Europeia (EN 13.631-16).

Outros formatos podem ser disponibilizados mediante solicitação do cliente.

Figura 62 - Características Técnicas do explosivo Riogel Troner (Maxam-Corp, 2009)

Mediante a de Kuznetov, calculamos o tamanho médio das partículas [figura 63] a partir de dados obtidos anteriormente.

• **Equação de Kuznetsov**

Correlação entre o tamanho médio do fragmento e a energia de detonação aplicada por unidade de volume de rocha (razão de carga)

$$X_{50} = FR \times (K)^{-0,80} \times Q_e^{0,167} \times \left(\frac{115}{Er} \right)^{0,633}$$

onde:

X_{50} é o tamanho médio de partícula (cm).

FR é o fator da rocha.

K é a razão de carga (kg/m^3).

Q_e é a massa do explosivo utilizado (kg).

Er representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (ANFO=100).

FR:	5,93
K:	0,171 (Kg/m^3)
Qe:	24,04 (Kg)
Er:	115,02
X(50):	41,34 (cm)
Volume	0,071 (m^3)
Massa	0,194 (Ton)
Peso	1,906 (KN)

Figura 63 - Programa de Previsão de Fragmentação - Calculo do tamanho médio das partículas.

O índice de uniformidade de Cunningham [figura 64] vai ser fundamental para o cálculo da distribuição resultante da fragmentação.

• **Índice de uniformidade de Cunningham:**

Essa expressão foi desenvolvida através de testes de campo por Cunningham (1987). Ela correlaciona todos os parâmetros geométricos do plano de fogo, como segue:

$$n = \left[2,2 - 14 \times \left(\frac{V}{d} \right) \right] \times \left[\frac{(1 + E/V)}{2} \right]^{0,5} \times \left\{ \left(1 - \frac{W}{V} \right) \times \left[\text{abs} \left(\frac{(HCF - HCC)}{L} \right) + 0,1 \right]^{0,1} \times \left(\frac{L}{H} \right) \right\}$$

Onde:

V é o afastamento (m).

E é o espaçamento (m).

d é o diâmetro do furo (mm).

W é o erro de perfuração (m).

L é o comprimento total de carga (m).

H é a altura do banco (m).

HCF é o comprimento da carga de fundo (m).

HCC é o comprimento da carga de coluna (m).

abs é o valor absoluto referente a $(BCL - CCL) / L$.

B:	3,00 (m)
D:	70,00 (mm)
S:	3,90 (m)
W:	0,46 (m)
BCL:	3,90 (m)
CCL:	6,77 (m)
L:	10,67 (m)
H:	12,00 (m)
n:	1,32

Figura 64 - Programa de Previsão de Fragmentação - Cálculo do índice de uniformidade de Cunningham.

Através da equação de Rosin-Rammler e com base em parâmetros anteriormente calculados, podemos finalmente chegar à curva de distribuição granulométrica [figura 65].

• **Equação de Rosin-Rammler:**

A distribuição de tamanho dos fragmentos é calculada pela equação de Rosin-Rammler:

$$P = 100 \times \left[1 - e^{-0,693 \times \left(\frac{X}{X_{50}} \right)^n} \right]$$

onde:

X é o tamanho da malha da peneira.

X_{50} é o tamanho médio de partícula, n é o índice de uniformidade.

P é o percentual de material passante na peneira de tamanho X .

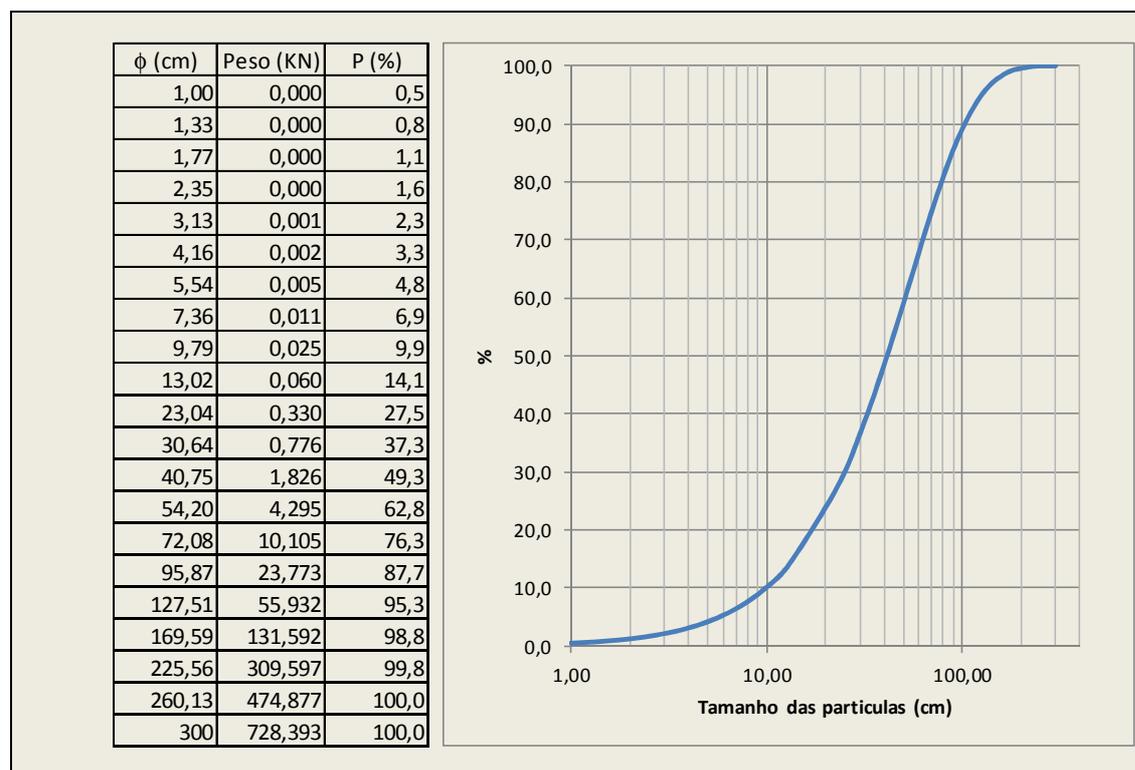


Figura 65 - Programa de Previsão de Fragmentação - Distribuição granulométrica do tamanho das partículas

Finalmente, através da conversão do Peso em tamanho de fragmentos foi possível organizar a distribuição dos fragmentos por gamas de pesos de enrocamento [figura 66].

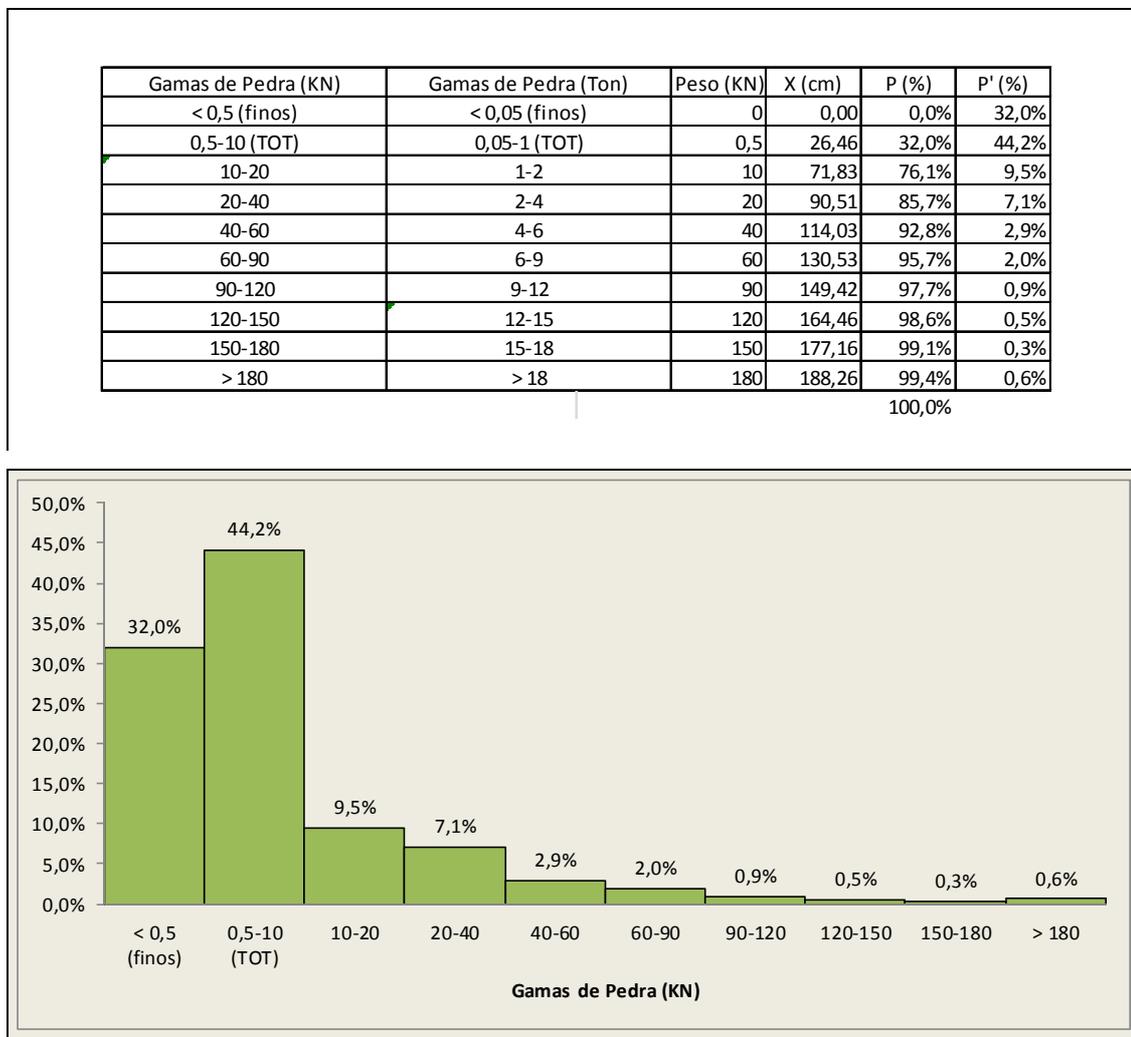


Figura 66 - Programa de Previsão de Fragmentação - Conversão e distribuição da fragmentação de uma pega de fogo em classes de enrocamento.

Exemplo 2:

Na produção de enrocamento para obras de manutenção, em que são exigidos apenas blocos de enrocamento de grandes dimensões, deverá-se-á otimizar os valores de input para se minimizar a produção de subprodutos.

Para a obtenção de blocos de maiores dimensões reduziu-se a carga específica, através da diminuição das concentrações lineares das cargas de fundo e coluna [figura 67 e 68].

Dados da pega de fogo:

- diâmetro do furo -> $d = 70$ (mm)
- Afastamento -> $V = 3$ (m)
- Espaçamento -> $E = 3,9$ (m)
- Altura da bancada -> $H = 12$ (m)
- Inclinação do furo -> 20°
- Concentração linear carga de fundo -> $2,00$ (Kg/m)
- Concentração linear carga de coluna -> $1,00$ (Kg/m)

DADOS:			
Tipo de Rocha:	Granito	ρ :	<input type="text" value="2,75"/> g/cm ³
Tipo de Maciço:	Compacto	RQD:	<input type="text" value="90-100"/> (%)
Diâmetro mínimo	67 (mm)		2,62 (in)
Diâmetro do Furo:	<input type="text" value="70"/> (mm)		2,76 (in)
Comprimento da Bancada:	<input type="text" value="50"/> (m)		
Numero de furos:	13 (furos)		
PARÂMETROS DE FURAÇÃO:			
V:	<input type="text" value="3,0"/> (m)	α :	<input type="text" value="20"/> (°)
E:	<input type="text" value="3,9"/> (m)	Sf:	0,9 (m)
H:	<input type="text" value="12,0"/> (m)	H1:	13,7 (m)
PARÂMETROS DE CARREGAMENTO:			
T:	<input type="text" value="3,0"/> (m)	TOTAL C.C:	6,8 (Kg)
H.C.C:	6,8 (m)	TOTAL C.F:	7,8 (Kg)
H.C.F:	3,9 (m)	TOTAL C.Furo:	14,6 (Kg)
TIPO DE EXPLOSIVO:			
Carga Coluna (C.C.):	<input type="text" value="Riogel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna)"/>		
Carga Fundo (C.F):	<input type="text" value="Riodin (Dinamite Gelatinosa)"/>		
Concentração C.C:	<input type="text" value="1,00"/> (Kg/m)	Consumo Especifico:	104 (g/m ³)
Concentração C.F:	<input type="text" value="2,00"/> (Kg/m)	Consumo Especifico:	38 (g/ton)
VOLUMES DESMONTADOS:			
Vol. de Rocha Desmontada por furo:	140,4 (m ³ /furo)	<p>poderá haver mau arranque de rocha (Ce < 60 g/ton)</p>	
Vol. Total de Rocha Desmontada:	1684,8 (m ³)		

Figura 67 - Programa de Previsão de Fragmentação - Diminuição da carga específica

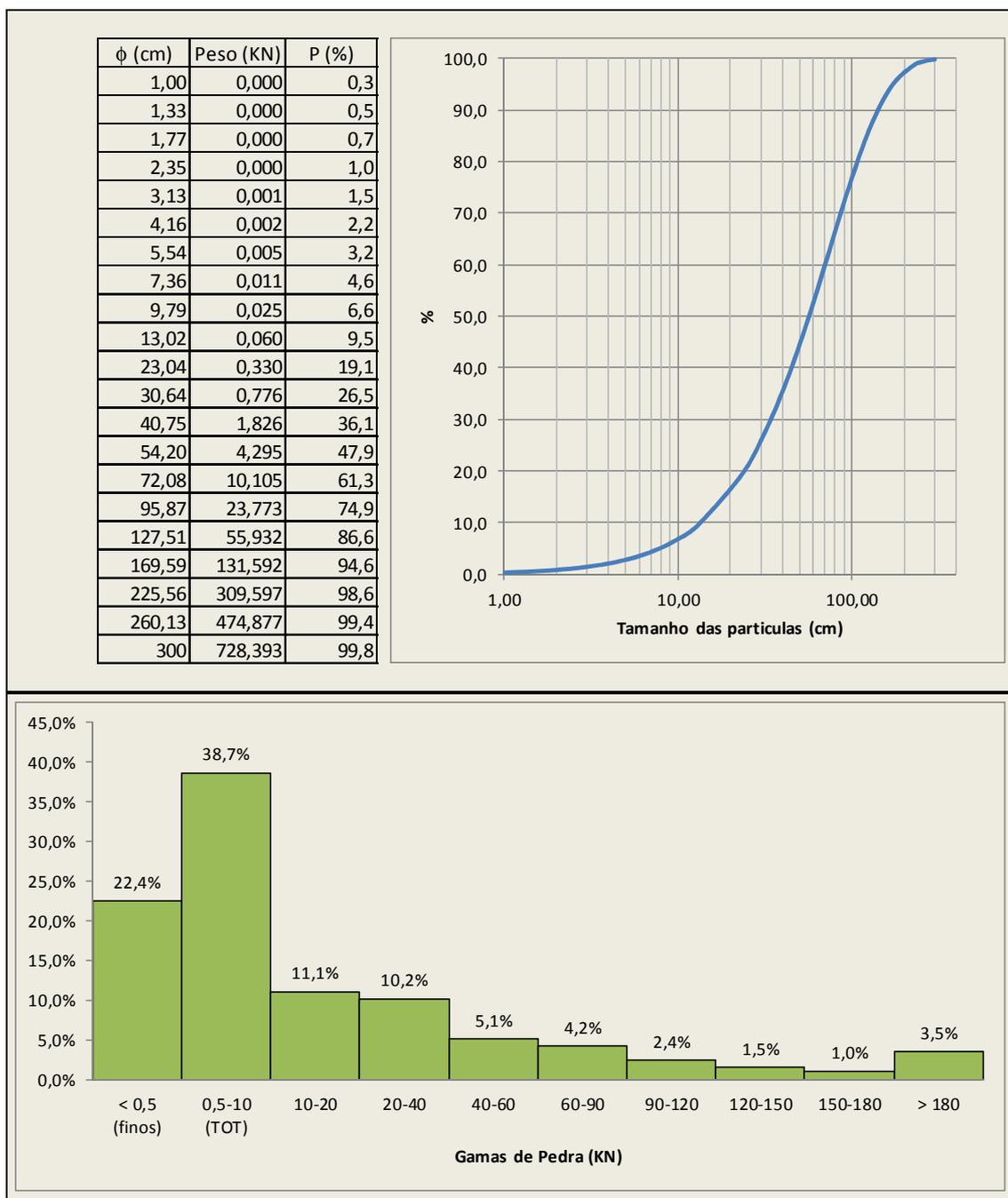


Figura 68 - Resultados da diminuição da carga específica no tamanho dos blocos

Embora seja possível aumentar os tamanhos dos blocos diminuindo a carga específica, este método, nem sempre é o mais adequado visto poder causar mau arranque de rocha, que por sua vez vai originar bancadas menos perfeitas e mais difíceis de atacar.

Exemplo 3:

Uma possibilidade alternativa, para obter blocos de maior dimensão, seria aumentar o tamponamento mantendo um consumo específico adequado [figura 69 e 70].

DADOS:			
Tipo de Rocha:	Granito	ρ :	2,75 g/cm ³
Tipo de Maciço:	Compacto	RQD:	90-100 (%)
Diâmetro mínimo	67 (mm)		2,62 (in)
Diâmetro do Furo:	70 (mm)		2,76 (in)
Comprimento da Bancada:	50 (m)		
Numero de furos:	13 (furos)		
PARÂMETROS DE FURAÇÃO:			
V:	3,0 (m)	α :	20 (°)
E:	3,9 (m)	Sf:	0,9 (m)
H:	12,0 (m)	H1:	13,7 (m)
PARÂMETROS DE CARREGAMENTO:			
T:	5,0 (m)	TOTAL C.C.:	9,1 (Kg)
H.C.C.:	4,8 (m)	TOTAL C.F.:	14,8 (Kg)
H.C.F.:	3,9 (m)	TOTAL C.Furo:	23,9 (Kg)
TIPO DE EXPLOSIVO:			
Carga Coluna (C.C.):	Riogel Troner por CC (Hidrogel para carga de coluna)		
Carga Fundo (C.F.):	Riodin (Dinamite Gelatinosa)		
Concentração C.C.:	1,90 (Kg/m)	Consumo Especifico:	170 (g/m ³)
Concentração C.F.:	3,80 (Kg/m)	Consumo Especifico:	62 (g/ton)
VOLUMES DESMONTADOS:			
Vol. de Rocha Desmontada por furo:	140,4 (m ³ /furo)		
Vol. Total de Rocha Desmontada:	1684,8 (m ³)		

Figura 69 - Programa de Previsão de Fragmentação - Aumentar o tamponamento.

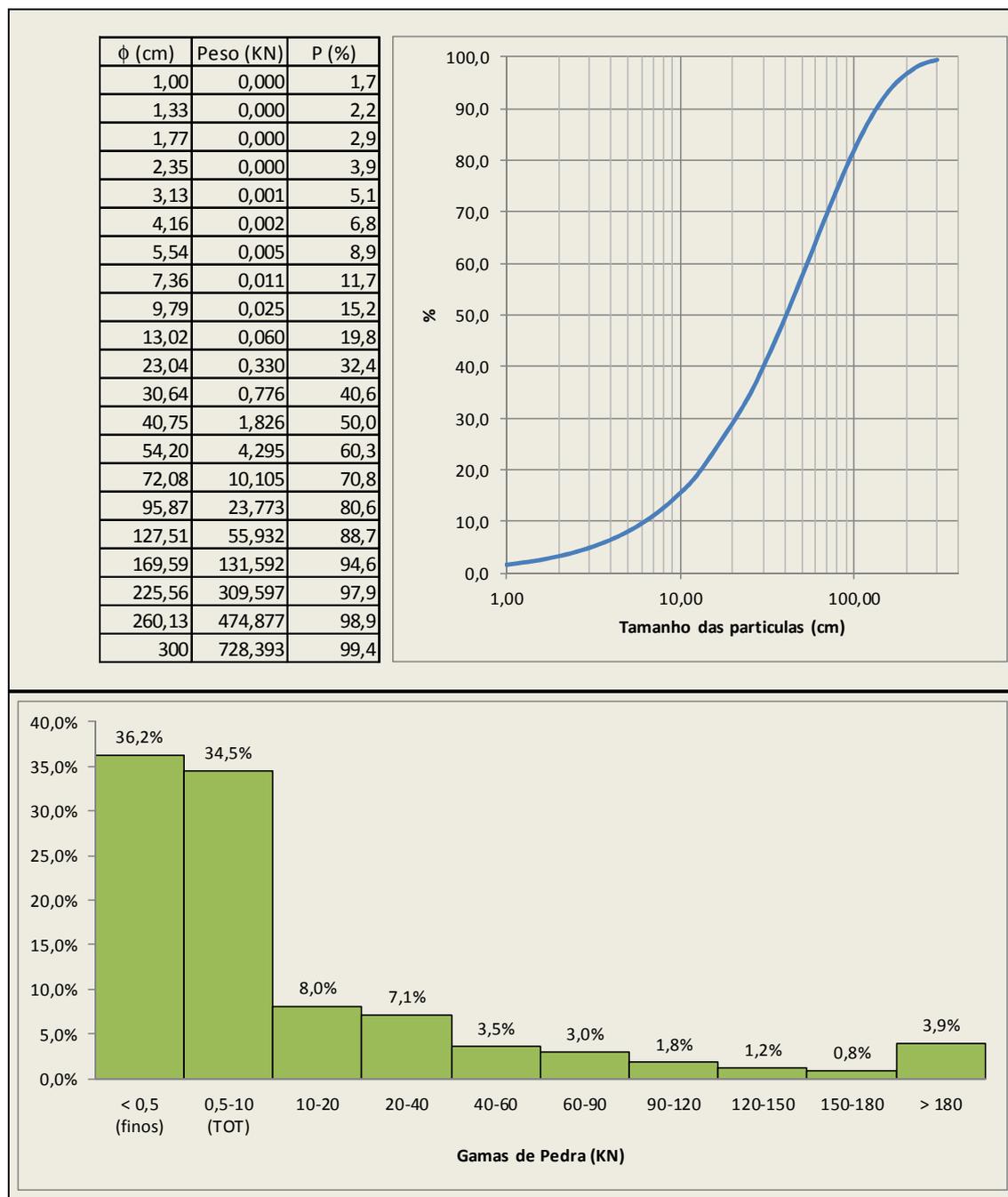


Figura 70 - Resultados do aumento do tamponamento no tamanho dos blocos.

A alteração do tamponamento, embora não cause variação significativa no tamanho médio dos blocos, permite uma variação significativa na distribuição dos tamanhos das partículas. Embora sejam produzidos mais finos, também vão ser produzidos blocos de maiores dimensões, podendo este procedimento, em muitos casos, a ser útil quando precisamos de blocos de grandes dimensões querendo ao mesmo tempo ter um bom arranque de rocha.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Em jeito de conclusão, e abordando primeiramente a problemática da erosão costeira que afeta grande parte da população mundial que vive no litoral, é evidente que a ocupação das zonas costeiras de forma imprudente pode causar diferentes tipos de problemas que podem ir desde a destruição das zonas ocupadas indevidamente até a destruição de outras zonas, que embora não estivessem a ser afetadas por a problemática da erosão, passaram a estar em zonas de risco devido á destruição das proteções naturais ou de interrompimento da passagem de sedimentos. É importante também no planeamento de obras de proteção ou de construções portuárias que se avaliem os problemas que estas podem causar nas imediações costeiras adjacentes. Também gostaria de salientar um exemplo de boas práticas da conservação da corda litoral em Portugal, como a criação de campos de dunas

fechados que apenas podem ser atravessados por passadiços conservando assim um ecossistema de proteção natural que têm a capacidade de se regenerar e não causando problemas às vizinhanças a jusante. Ilustra esta situação, o Parque das Dunas da Aguda, promovido pela Câmara Municipal de Gaia em parceria com o Parque Biológico de Gaia [figura 71].



Figura 71 - Parque de dunas da Agúda (Leite, 2010).

Quanto ao modelo construído de previsão de fragmentação, poderá ser uma ferramenta útil no planeamento de uma pedreira para a produção de enrocamento. No entanto no caso de uma pedreira que tenha só como função produzir apenas enrocamento haverá sempre o problema da produção de finos que serão um subproduto sem nenhum valor acrescentado. Outra condicionante que poderá surgir consiste, por exemplo, será na produção de enrocamento para obras de manutenção em que são exigidos apenas blocos de enrocamento de grandes dimensões. Nestes casos poderão ter que ser utilizadas cargas específicas mais baixas do que o recomendado, o que em alguns casos poderá originar mau arranque de rocha, ficando as próximas bancadas menos perfeitas e mais difíceis de atacar.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Um trabalho futuro interessante a realizar seria o da avaliação de custos de produção do enrocamento em dois âmbitos distintos: o primeiro seria o caso de uma pedreira comercial que para além do enrocamento também fornecesse outros produtos (como sucede na maioria dos casos) e outro seria o caso uma pedreira que iria abrir com o único propósito de produzir enrocamento para uma ou várias obras costeiras na vizinhança dessa pedreira. Outro tema interessante consistiria em avaliar os custos de transporte e acessibilidade para seleção de pedreiras para a produção de enrocamento, estudo em que fossem contemplados desde fatores de seleção, como a qualidade do maciço e distância à pedreira, até aos custos de manutenção das obras.

Referências

Bibliografia

- ANPC. (2010). *Riscos Costeiros - Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território*. Autoridade Nacional de Protecção Civil.
- ASP World Tour. (2012). *ASP World Tour - Association of Surfing Professionals*. Obtido em 9 de Junho de 2012, de www.aspworldtour.com
- Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. (2010). *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*. Obtido em 20 de 6 de 2012, de www.aprh.pt
- Bell, F. G. (1998). *Environmental Geology*. Blackwell Science.
- Branco, F. C. (2009). *Levantamento das Características dos Agregados dos Agregados Produzidos em Portugal*. Coimbra: FCTUC.
- Brazão, J. L. (2011). *Aterros Ferroviários de Misturas de Solo e Enrocamento*. Lisboa: IST.
- Centro de Estudos do Mar - UFPR. (2005). *Portal de Praias*. Obtido em 9 de Junho de 2012, de www.cem.ufpr.br
- Coelho, C. D. (2005). *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Aveiro: Universidade de Aveiro.

- Engenharia Concursos. (2011). *Engenharia Concursos*. Obtido em 1 de Junho de 2012, de Engenharia Concursos: <http://www.engenhariaconcursos.com.br>
- EuroSION. (2004). *Viver com a Erosão Costeira na Europa*. União Europeia.
- Gomes, F. V. (2011). *Estrutura Longitudinal Aderente - Mindelo*. Mindelo: FEUP.
- Gomes, F. V. (s.d.). *Erosão Costeira e Ordenamento do Território na Costa da Caparica*. Porto: Instituto da Água, FEUP.
- Gomes, V. (s.d.). *Intervenções e Estruturas de Proteção Costeira*. Porto: FEUP.
- Google Earth. (7 de Setembro de 2012). Google Earth.
- Gustafsson, R. (s.d.). *Blasting Technique*.
- INAG. (2005). *Instituto da Água*. Obtido em 16 de 07 de 2012, de Instituto da Água: www.inag.pt
- INAG. (2006). *Reconstrução Dos Dois Esporões da Praia de Mira*. Mira: Instituto da Água.
- Instituto da Água. (2004/2005). *Empreitada de Reparação dos Esporões e das Obras Aderentes da Costa da Caparica e da Cova do Vapor*. Instituto da Água.
- Instituto Hidrográfico. (2012). *Instituto Hidrográfico*. Obtido em 18 de 6 de 2012, de <http://www.hidrografico.pt>
- Irmãos Cavaco, SA. (s.d.). www.isca.pt. Obtido em 1 de Julho de 2012, de Irmãos Cavaco, SA: www.isca.pt
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1978). *Enrocamentos*. Lisboa: LNEG.
- Langefors, U., & Kihlstrom, B. (s.d.). *The Modern Technique of Rock Blasting*. Estocolmo: Almqvist & Wiksell.
- Leite, A. (2010). *Apontamentos Geologia Costeira*.
- Machado, G. M. (2007). *Análise Morfo-Sedimentar da Praia, Antepraia e Plataforma Continental Interna da Linha de Costa do Parque Nacional de Jerubatiba - RJ*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Maxam Corp. (2009). *Catálogo MaxamPor*. Maxam Corp.
- Maxam-Corp. (2009). *Catálogo MaxamPor - Explosivos*. Portugal.

- Mishra, A. (2009). *Design of Surface Blasts- A Computational Approach*.
- Morais, J. L., & Gripp, M. d. (2004). *Fundamentos para simulação dos desmontes de rocha por explosivos*. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto.
- Neves, L. P. (2003). *Geossintéticos e Geosistemas em Engenharia Costeira*. Porto: FEUP.
- Nuno Vasconcelos. (25 de Julho de 2012). Fotos Foz-Maceda. Porto.
- Pereira, C. A. (2010). *Risco de Erosão para Diferentes Cenários de Evolução do Litoral de Aveiro*. Aveiro: Universidade da Aveiro.
- Pereira, E., Leite, A., & Miranda, H. (2000). *Caracterização Geológico/Estrutural da Pedreira Quinta do Moinho*. Canidelo, Vila Nova de Gaia: FEUP.
- Pires, A., & Gomes, A. (2009). *Geomorfologia 2008*. Braga: Associação Portuguesa de Geomorfólogos.
- Press, F., & Siever, R. (2001). *Understanding Earth - Third Edition*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Silva, A., Guimarães, B., & Nunes, L. (2010). *Tranporte de Tetrápodes - Espinho*. Porto: FEUP.
- Sociedade Portuguesa de Explosivos. (1994). *Manual de Explosivos e suas Aplicações*. Lisboa: SPEL.
- Unibetão. (2011). *Unibetão*. Obtido em 1 de Julho de 2012, de Unibetão: www.unibetao.pt
- Waikato Regional Council. (s.d.). *Waikato Regional Council*. Obtido em 1 de Agosto de 2012, de Waikato Regional Council: <http://www.waikatoregion.govt.nz>
- Wikipédia. (2012). *Wikipédia*. Obtido em 2012 de Agosto de 1, de Wikipédia: www.wikipédia.pt
- www.prof2000.pt. (s.d.). *A Dinamica Litoral*. Obtido em 12 de Julho de 2012, de A Dinamica Litoral: http://www.prof2000.pt/users/ildamac/geo/litora.htm#Principais_processos_de_evolucao_da_linha_da_costa0

