

PRÉ-AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL (2D) DO IMPACTO DA SUBIDA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR NA ALTERAÇÃO DA MORFOLOGIA DE UM SECTOR COSTEIRO ARENOSO ARTIFICIALIZADO

JOSÉ EDUARDO SOUSA ANDRADE GOMES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes

JULHO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*"No man is an island,
Entire of itself.
Each is a piece of the continent,
A part of the main."*

*For Whom the Bell Tolls
John Donne*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, que me proporcionaram, durante mais tempo do que lhes “competia”, não só o privilégio de uma educação superior, como o acesso a todas as ferramentas que promovessem o meu desenvolvimento a todos os níveis, ferramentas que nem sempre soube aproveitar.

Agradeço também ao orientador deste trabalho, Professor Fernando Veloso Gomes, não só pela sua disponibilidade, bem como pelo seu interesse no tema, que serviu um pouco de agente estimulante à concretização desta dissertação.

Não me esqueço também do apoio prestado pelo Sr. Miguel, a quem atribuo especial relevância, pela sua sempre pronta ajuda, a mais níveis do que aqueles que eram da sua incumbência.

À Dona Esmeralda, pela sua simpatia e preocupação genuína.

Agradeço também aos meus colegas, Pedro Vinagre, João Chambel, Tomás Cabral e Daniel Clemente, que me apoiaram na aprendizagem e utilização dos sistemas de aquisição de dados e a resolver os problemas mais práticos que foram surgindo.

Por último fica o agradecimento à minha namorada, Rosário Monteiro, por mais do que simples apoio, ser um estímulo constante à luta contra o ócio.

RESUMO

Este trabalho é desenvolvido no âmbito da opção de Hidráulica do mestrado integrado em engenharia civil, da Faculdade de Engenharia do Porto.

A subida do nível da água do mar, é um fenómeno já há muito documentado. Associado a este fenómeno, está o recuo da linha de costa por ação erosiva. A relação entre estas evidências é o foco do presente trabalho, procurando fazer uma análise crítica às metodologias aplicadas nos Programas de Ordenamento Costeiro, na previsão do comportamento a 2D dos perfis de praia face à elevação marítima.

Recolheram-se tipologias de perfis costeiros da costa Portuguesa, em concreto do troço Caminha-Espinho, considerando a sua forma, o regime energético do mar e a exposição da praia, bem como a existência de construção na costa e obras de proteção. Procedeu-se então à elaboração de modelos à escala, inspirados nestes perfis, procurando retirar elações quanto à validade da aplicação da “Regra de Bruun” (Schwartz,1967), sobre a qual são construídos os Programas da Orla Costeira (POCs), no respeitante à previsão da evolução da linha de costa e definição de zonas de risco ou de salvaguarda.

Este trabalho ganha especial relevância, envolvendo-se na discussão relativa aos POCs, pondo em causa os pressupostos sobre os quais assenta a regra, tanto ao nível da sua validade, algo que não é consensual, como a um nível mais particular da sua aplicabilidade aos locais em questão.

Numa primeira fase será feito um enquadramento histórico da Regra de Bruun, desde a proposta original, às críticas, alterações e aplicações. Também será efetuada uma síntese dos pressupostos em que a mesma se baseia criticando-os quanto à possibilidade da sua transposição a um cenário real, se os resultados são otimistas, pessimistas ou realistas, de forma a poder melhor entender as vantagens e desvantagens da aplicação da regra.

Na segunda fase do trabalho procurar-se-á recolher algumas tipologias de secções transversais da costa, comparar as condições da mesma aos pressupostos assumidos por Bruun (Bruun,1988). Através da modelação em laboratório comparam-se os resultados com um ensaio de controlo onde se assumem os pressupostos inerentes à regra, tentar perceber de que forma as diferentes condições, reais, afetam a aplicabilidade da mesma pondo, ou não em causa a sua utilização.

A fase final do trabalho retira conclusões da fase experimental, da forma mais objetiva possível, assumindo as limitações dos modelos à escala.

ABSTRACT

This work was developed within the scope of the Hydraulics option of the integrated master's degree in civil engineering, from the Faculdade de Engenharia do Porto.

The rising of the sea level is a phenomenon that has long been documented. Associated with it is the retreat of the coastline, by erosive action. The relationship between these evidences is the focus of the present work, trying to make a critical analysis of the methodologies applied in the prediction of the 2D behavior of the beach profiles in relation to the sea elevation.

Through the collection of typologies of coastal profiles of the Portuguese coast, specifically the Caminha-Espinho section, considering its shape, the sea energy regime and the beach exposure, as well as the existence of coast development and protection works. We will then proceed to the elaboration of models at the scale of these profiles, seeking to withdraw suggestions regarding the validity of the "Bruun Rule" (Schwartz, 1967), on which the POC is constructed.

This work gains special relevance, in the discussion on the POC, calling into question the assumptions on which the Bruun's Rule is based, both in terms of its validity, something that is not consensual, and at a more particular level, of its applicability to the location in question.

In a first phase, a historical framework of the Rule, from the original proposal, to the criticisms, changes and applications will be made, a summary of the assumptions on which it is based, criticizing them as to their transposition to a real scenario, if the results are optimistic, pessimistic or realistic, in order to better understand the advantages and disadvantages of applying the rule.

In the second phase of the work, different types of cross-sections of the coast, were collected, the conditions of the coast were compared with the assumptions made by Bruun (Bruun, 1988).

Through laboratory modeling, the results are compared with a control test where if one assumes the assumptions inherent in the rule, trying to understand how the different conditions affect the applicability of the rule. The final phase of the work will be reserved for drawing conclusions from the experimental phase, in the most objective way possible and assuming the limitations of the scale models.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. REGRA DE BRUUN	1
1.3.1. Proposta Original	1
1.3.2. Validação da Teoria de Bruun	3
1.3.3. Suporte e Adaptação da Regra de Bruun	4
1.3.4. Pressupostos e Limitações	5
1.3.5. Validade/Crítica à Aplicação da Regra de Bruun	6
2. CARACTERIZAÇÃO SUMÁRIA DA COSTA	7
2.1. A COSTA PORTUGUESA	7
2.1.1. Norte (Caminha-Espinho)	7
2.1.2. Centro (Ovar- Marinha Grande)	8
2.1.3. Tejo e Oeste (Alcobaça- Cabo Espichel)	10
2.1.4. Alentejo (Cabo Espichel- Odeceixe).....	11
2.1.5. Algarve (Odeceixe- Vilamoura).....	12
2.1.6. Algarve (Vilamoura-Vila Real de Santo António)	13
2.2. FORMAÇÕES GEOLÓGICAS	14
2.2.1. Rias e Estuários	14
2.2.2. Promontórios/ Cabos.....	19
2.2.3. Baías.....	20
2.3. ARTIFICIALIZAÇÃO DA COSTA	21
2.3.1. Estruturas Aderentes	21
2.3.2. Esporões	22
2.3.3. Quebramares e Molhes.....	23
2.4. APLICAÇÃO DE BRUUN NA REALIDADE DA COSTA PORTUGUESA	25
3. MODELO	29
3.1. MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO MODELO	29
3.2. EQUIPAMENTO.....	29
3.2.1. Tanque de Ondas.....	29
3.2.2. Sondas de Nível	30
3.3. SEMELHANÇA DE ESCALA.....	30
3.3.1. Escala geométrica	30
3.3.2. Semelhança de Froude	31
3.4. PERFIL TRANSVERSAL.....	31
3.4.1. Perfil Tipo	31
3.4.2. Perfil com enrocamento	33
4. TRABALHO EXPERIMENTAL	35
4.1. ENQUADRAMENTO DA EXPERIÊNCIA	35
4.2. CONDIÇÕES DE ENSAIO	35
4.3. RESULTADOS E ANÁLISE.....	37
4.3.1. Ensaio A1	37
4.3.2. Ensaio A2.1	38
4.3.3. Ensaio A2.3	39
4.3.4. Ensaio B1	42
4.3.5. Ensaio B2.1	42
4.3.6. Ensaio B2.2	43
4.3.7. Ensaio B3.1	43
4.3.8. Ensaio B3.2	44
4.4. RESUMO GRÁFICO DAS SÉRIES DE ENSAIOS.....	46
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	48
5.1. SÍNTESE.....	48
5.2. CONCLUSÕES.....	48

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS49

Índice de Figuras

Figura 1- A Regra de Bruun (adaptado de Schwartz,1967)	2
Figura 2- Variáveis da Regra de Bruun (adaptado de Bruun,1962)	2
Figura 3- Cape Cod, Massachusetts (Schwartz,1967)	3
Figura 4- Resposta do "foreshore" para 2 regimes de energia de ondas (baixo e alto) e uma subida do nível da água quando ocorre erosão (Dubois 1975).....	4
Figura 5- as variáveis do "nearshore" (Dubois 1976)	4
Figura 6- Praia do Sr. da Pedra, Arcozelo (Google Maps)	8
Figura 7- Praia de S. Pedro de Maceda, Maceda (Google Maps).....	8
Figura 8- Praia da Torreira a norte do sistema lagunar de Aveiro(Google Maps)	9
Figura 9- Cabo do Mondego (Google Maps)	9
Figura 10- Promontório de Pedrogão (Google Maps)	9
Figura 11- Praia da Nazaré, a sul de arribas rochosas e do canhão da Nazaré (Google Maps).....	10
Figura 12- Praia da Fonte da Telha, a sul do estuário do Tejo (Google Maps).....	10
Figura 13- Arco arenoso entre estuário do sado e Sines (Google Maps)	11
Figura 14- Praia da Azenha do Mar, Odeceixe (Google Maps).....	11
Figura 15- Praia D. Ana (Google Maps)	12
Figura 16- Praia da Falésia (Google Maps).....	12
Figura 17- Praia de Faro (Google Maps).....	13
Figura 18- Algumas formações geológicas da costa Portuguesa	14
Figura 19- Ria de Aveiro, Vista satélite (Google Maps).....	15
Figura 20- Ria de Aveiro (Google Maps)	15
Figura 21- Ria Formosa, vista satélite (Google Maps)	16
Figura 22- Ria Formosa (Google Maps)	16
Figura 23- Ria de Alvor, vista satélite (Google Maps)	17
Figura 24- Ria de Alvor (Google Maps)	17
Figura 25- Estuário do Tejo, vista satélite (Google Maps).....	18
Figura 26- Estuário do Tejo (Google Maps)	18
Figura 27- Estuário do Sado, vista satélite (Google Maps)	19
Figura 28- Estuário do Sado (Google Maps)	19
Figura 29- Cabo Espichel (Google Maps)	20
Figura 30- Concha de S. Martinho do Porto, vista satélite (Google Maps)	20
Figura 31- Concha de S. Martinho do Porto (Google Maps)	21
Figura 32- Estrutura aderente em enrocamento, Mindelo (Google Maps)	22
Figura 33- Revestimento em betão, Granja, S. Félix da Marinha (Google Maps).....	22
Figura 34- Influência dos esporões na redefinição da linha de costa.....	23
Figura 35- Campo de Esporões, Espinho-Maceda (Google Maps).....	23
Figura 36- Quebramares ou molhes do Porto de Leixões (Google Maps)	24
Figura 37- Nomeclatura destacado, Praia da Aguda, Arcozelo (Google Maps)	24
Figura 38- Nomenclatura adotada do zonamento da praia (http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html)	25
Figura 39- Praia da Duna do Caldeirão (Google Maps)	25
Figura 40- Perfil total da praia da Duna do Caldeirão (https://cosmo.apambiente.pt).....	26
Figura 41- Perfil Emerso da Praia da Duna do Caldeirão (https://cosmo.apambiente.pt).....	26
Figura 42- Monte Estoril	27
Figura 43- Perfil Monte Estoril	27
Figura 44- Praia de S. Pedro do Estoril	28
Figura 45- Perfil da Praia de S. Pedro do Estoril	28
Figura 46- Tanque de Ondas da FEUP	29
Figura 47- Sondas de Nível (2 de 3).....	30
Figura 48- Perfil tipo real com estrutura aderente e duna natural representada, Mindelo (projeto FEUP, Veloso Gomes 2014)	31
Figura 49- Secções transversais adjacentes ao perfil tipo, Mindelo (projeto FEUP, Veloso Gomes 2014)	32
Figura 50- Modelo do Perfil Tipo	33
Figura 51- Etapas de construção do Modelo com estrutura aderente; TOT- cima esquerda, camada inferior-cima direita, camada superior-baixo	34
Figura 52- Curva de "remate" no ensaio A1	37
Figura 53- Rugas na parte submersa do perfil no ensaio A1	37

Figura 54- Ligeira depressão no fundo na zona de rebentação	38
Figura 55- Instabilidade da parte superior da praia no ensaio A2.1	38
Figura 56- Suavização da inclinação da praia no ensaio A2.1	39
Figura 57- Formação de uma barra de sedimentos longitudinal no ensaio A2.1	39
Figura 58- Elevação do talude mantendo a mesma inclinação no ensaio A2.3	40
Figura 59- Colapso da parte superior da praia	40
Figura 60- Recuo da barra longitudinal	41
Figura 61- Efeitos 3D	41
Figura 62- Infraescavação por efeito de parede no ensaio B2.1	42
Figura 63- Assentamento pontual da estrutura de proteção no ensaio B2.1	42
Figura 64- Ensaio B2.2	43
Figura 65- Ensaio B3.1	43
Figura 66- Inclinações no Ensaio B3.2	44
Figura 67- Acumulação de sedimentos no pé do talude no ensaio B3.2	44
Figura 68- Efeitos tridimensionais no ensaio B3.2 (vista de cima)	45
Figura 69- Efeitos tridimensionais no ensaio B3.2 (alçado)	45
Figura 70- Gráficos dos resultados dos ensaios da série A	46
Figura 71- Gráficos dos resultados dos ensaios da série B	47

Índice de Tabelas

Tabela 1- Efeitos negativos da aplicação da regra de Bruun na estimativa do recuo da costa face a uma subida do nível da água (Roshanka Ranasinghe et. al, 2007)	5
Tabela 2- Registo do número por classes de alturas significativas de onda e respetivos períodos com base nos registos na boia oceanográfica de Leixões entre 1981 e 2003 (Coelho 2005).....	36
Tabela 3- Resumo dos ensaios realizados.....	36

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

A- Parâmetro referente às características do sedimento

B- Altura da duna

h- Profundidade de fecho

GB- Balanço de sedimentos

Hs- Altura significativa da onda

L- Largura do perfil ativo

NMM- Nível médio do mar

P- Fração decimal da areia erodida da praia que é compatível com os sedimentos presentes na zona de rebentação

POC- Programa de Orla costeira

R- Recuo da linha de costa

S- Aumento do nível das águas do mar

THs- Período da ondulação

TOT- Enrocamento de todo o tamanho

W- Largura da Barreira

y- Distância offshore

ZH- Zero Hidrográfico

θ - ângulo

$\frac{\partial Q_s}{\partial y}$ - Gradiente e da deriva litoral

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

O aumento do nível médio das águas do mar, tem vindo a tornar-se um assunto de elevado interesse publico e foco mediático. Apesar disso, essa ocorrência e os seus efeitos não são novidade na comunidade científica, que tem vindo desde meados do século passado, a procurar métodos de previsão tanto do aumento do nível médio do mar, como dos efeitos que tal fenómeno induz na linha de costa. Este trabalho debruça-se sobre o efeito de recuo da linha de costa por erosão transversal. Tendo como base as observações feitas por Bruun (1962) e subseqüentes trabalhos apoiados, favoráveis ou não, nas mesmas.

A motivação para o trabalho em questão, está na discussão atual respeitante à definição das zonas de risco ou de “salvaguarda”, previstas nos Programa da Orla Costeira (POCs), mais concretamente na zona de Caminha-Espinho são zonas definidas por previsão de um recuo da linha de costa assente nas relações de transporte transversal de sedimentos na zona costeira.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal, evidenciar a aplicabilidade ou não aplicabilidade da metodologia adotada nos recentes POCs na definição das zonas de risco na costa Portuguesa. Fazendo também comentário tanto a potenciais problemas ou limitações inerentes à regra de Bruun, como as virtudes da mesma.

1.3. REGRA DE BRUUN

1.3.1. PROPOSTA ORIGINAL

Bruun (1962), propõe uma teoria, de base empírica, que relaciona o comportamento de resposta dos perfis de praia, assumindo o seu equilíbrio (Bruun, 1954), com o já na altura documentado aumento do nível médio da superfície do mar.

O perfil em equilíbrio pode ser descrito através da equação (1), onde a profundidade da água é representada por h , a distância “offshore” (distância entre a linha de costa e profundidade h) por y e por um parâmetro A , referente às características do sedimento.

$$h = Ay^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

As relações quantitativas destes elementos, ilustradas na Figura 1, são:

- Um recuo do perfil da praia, por erosão da parte superior do mesmo;
- O volume erodido na parte superior do perfil é igual ao depositado no fundo do “nearshore”;
- A profundidade mantém-se constante, uma vez que se admite que a elevação do fundo por depósito de sedimentos, é igual ao aumento do nível da água do mar.

O transporte de sedimentos ao longo da linha de costa não é considerado. Parte-se do pressuposto que na ausência de obras que o impeçam, existe uma reposição cíclica dos sedimentos removidos pela deriva litoral.

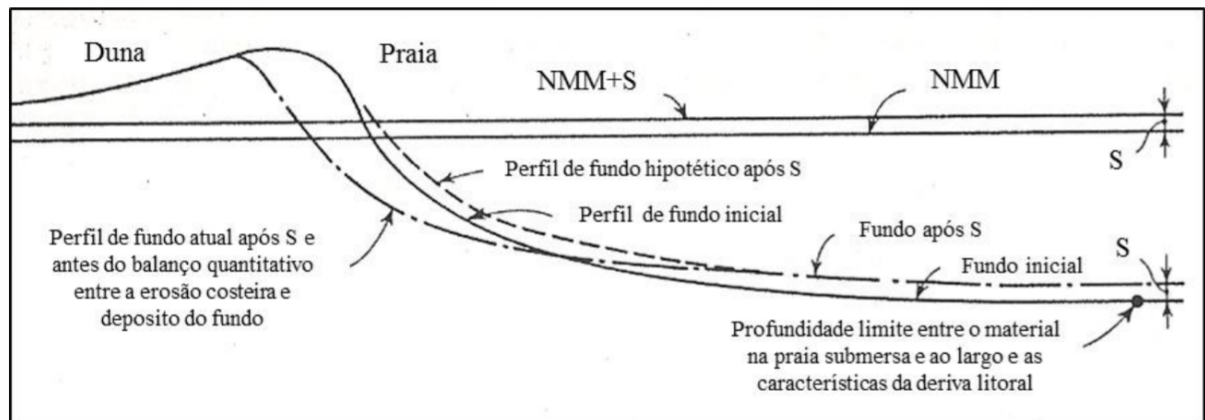


Figura 1- A Regra de Bruun (adaptado de Schwartz, 1967)

Na sua forma básica, a expressão proposta por Bruun (1962) é a apresentada na equação (2). A expressão refere de uma forma simplificada, que com o aumento do nível médio da superfície do mar (S), existe um recuo da parte superior da praia por efeito da erosão (R). Os sedimentos erodidos, depositam-se no fundo do “nearshore” (próximo da linha de costa) até a uma profundidade de fecho (h), profundidade a partir da qual o transporte de sedimentos por ação das ondas é desprezável ou nulo.

$$R = \frac{L}{B+h} S = \frac{1}{\tan \theta} S \quad (2)$$

L é a distância entra a linha de costa, em relação ao nível médio inicial de água, e a profundidade de fecho h (largura do perfil ativo), B representa a altura da duna, ou de outro elemento sedimentar na costa, que sofre erosão e S é o aumento do nível da água, variáveis representadas na Figura 2.

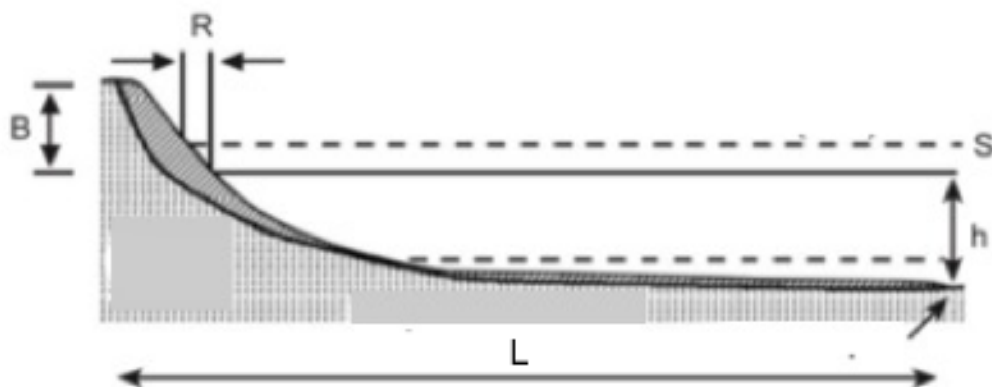


Figura 2- Variáveis da Regra de Bruun (adaptado de Bruun, 1962)

1.3.2. VALIDAÇÃO DA TEORIA DE BRUUN

Maurice L. Schwartz (1967) elevou, a até então teoria proposta por Per Bruun, a “Regra de Bruun”. Para o efeito, Schwartz testou a teoria em dois modelos laboratoriais em pequena escala, assim como se baseou num ensaio de campo.

O primeiro modelo consistiu numa “stream table”, onde se consideraram 3 variáveis como principais características do desenvolvimento de um perfil de praia, numa série de ensaios em que se mantiveram constantes duas das variáveis (ondulação e material), fazendo variar a elevação relativa da água.

O segundo modelo, num tanque de ondas, permitiu ensaiar mais variáveis numa maior escala e com maior controlo. Este modelo também permitiu mitigar alguns erros inerentes ao ensaio anterior.

Ambos os ensaios deram resultados concordantes com a teoria base.

O ensaio de campo foi elaborado em Cape Cod, Massachusetts, representado na Figura 3, em dois locais com condições diferentes. Num primeiro local, Nauset Light Beach, as condições são as de uma praia retilínea, exposta à ondulação do Atlântico. A ondulação normal no Verão tem um período de 8 segundos e uma altura de 30 centímetros. A direção predominante da ondulação é de sudeste, provocando uma deriva de costa em direção a norte. O fundo “nearshore” tem uma inclinação suave. Na segunda localização, as condições são quase opostas, tratando-se de uma praia protegida, orientada a sudoeste, com ondulação (face a uma brisa pequena) de 15-20 centímetros, com um período de 3 segundos, provenientes de noroeste (no Verão) provocando então uma deriva costeira para sul. O fundo “nearshore” tem uma grande inclinação que vai evoluindo para uma inclinação mais suave.

No ensaio de campo, utilizou-se a variação entre as marés baixas das marés mortas e vivas, como se apresentassem um aumento do nível da água do mar.

Tal como nos ensaios laboratoriais, também o ensaio de campo validou as hipóteses de Per Bruun, passando a sua teoria a apelar-se de “Regra de Bruun”.

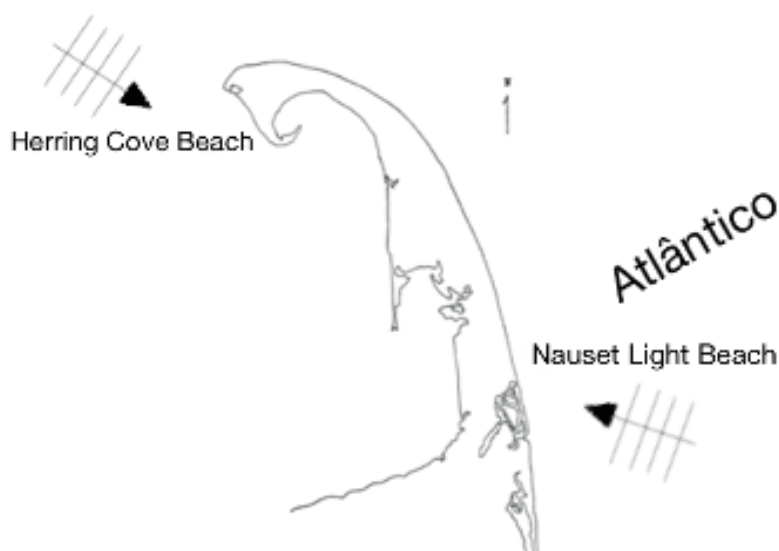


Figura 3- Cape Cod, Massachusetts (Schwartz, 1967)

1.3.3. SUPORTE E ADAPTAÇÃO DA REGRA DE BRUUN

Subsequentes estudos vieram suportar as observações feitas por Bruun, mas alguns fenómenos costeiros associados à elevação do nível do mar careciam de definição.

Roger Dubois (1975), levou a cabo um estudo num ambiente de água doce, lago Michigan, no Terry Andrae State Park, Wisconsin, com a intenção de melhor caracterizar o comportamento do “foreshore” (porção de terra compreendida entre as linhas de maré) face à subida do nível da água. Para o efeito, Dubois, estudou o comportamento do “foreshore” face a duas variáveis, representadas na Figura 4, o aumento do nível da água (de MSL1 para MSL2=xy) e dois diferentes regimes de energia das ondas (AB e CD).

O estudo demonstrou que para um certo nível de energia de ondulação, o “foreshore” eleva-se numa proporção direta com o aumento do nível da água ($AC'=ac'=B'D=xy$) e recua paralelamente a si mesmo.

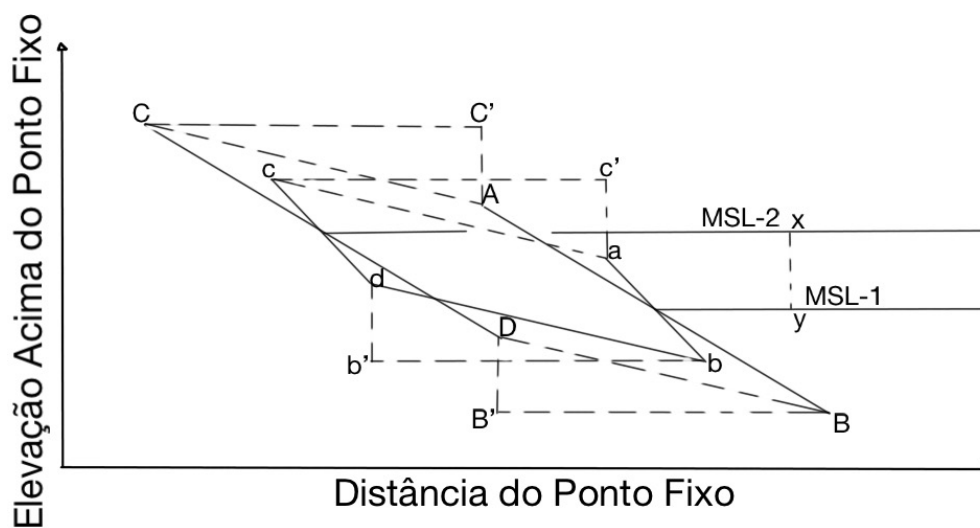


Figura 4- Resposta do “foreshore” para 2 regimes de energia de ondas (baixo e alto) e uma subida do nível da água quando ocorre erosão (Dubois 1975)

Também foi alvo de estudo o depósito de sedimentos no “nearshore” (Dubois,1976), para o mesmo lago, onde existem 3 barras de sedimentos paralelas à praia. Apenas duas destas barras, em dois destintos perfis foram alvo de análise. A Figura 5 representa o perfil tipo analisado e as variáveis em questão. Neste estudo a regra de Bruun (Brunn,1962) é verificada apenas na primeira barra.

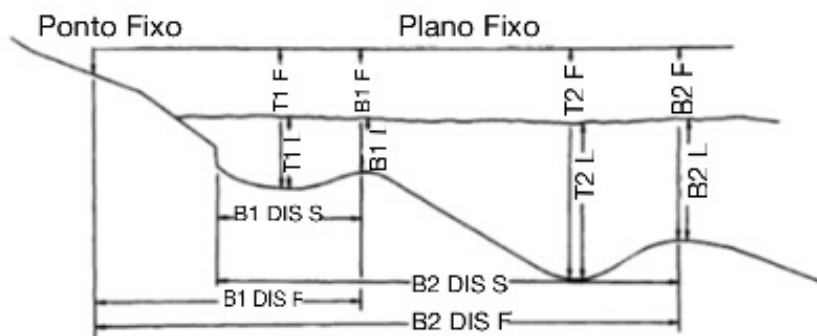


Figura 5- as variáveis do “nearshore” (Dubois 1976)

Dean (1977) conclui que o parâmetro A , da equação de equilíbrio dos perfis, é função da granulometria dos sedimentos, passando a assumir que o perfil e o seu equilíbrio, são controlados apenas pelo tamanho dos sedimentos.

1.3.4. PRESSUPOSTOS E LIMITAÇÕES

A regra de Bruun (1962) tem algumas limitações respeitantes à sua aplicação mais generalizada, uma vez que assenta em alguns pressupostos para que funcione.

- Só é aplicável para perfis de praia em equilíbrio;
- Não considera variáveis tridimensionais, como a deriva litoral;
- Não tem em conta eventuais perdas de sedimentos para lá da profundidade de fecho e para a costa (“overwash”);
- Assume que as propriedades dos sedimentos são semelhantes ao longo de todo o perfil, desconsiderando também os sedimentos mais finos que não se mantêm na zona litoral.

A aplicação da regra em ambientes que não se enquadrem de alguma forma, nestes pressupostos pode levar à subestimação ou sobrestimação, dependendo dos casos, do efeito previsto por Bruun.

Na Tabela 1 são apresentados alguns desses eventuais casos.

Tabela 1- Efeitos negativos da aplicação da regra de Bruun na estimativa do recuo da costa face a uma subida do nível da água (Roshanka Ranasinghe et. al, 2007)

Ambiente	Efeito da aplicação da regra de Bruun
Perfil não está em equilíbrio	Sub/Sobrestimação
Adjacente a obras de proteção/promontório	Subestimação das perdas e sobrestimação de ganhos por transporte da deriva
Proteção da costa por parte de formações rochosas no "nearshore"/barreiras de coral	Sub/Sobrestimação
Adjacente a deltas	Subestimação das perdas e sobrestimação de ganhos "nearshore"- "offshore"
Linhas de costa com gradientes de deriva costeira significativos	Sub/Sobrestimação (dependendo da direção da deriva)
Zonas sem dunas/perfis baixos, propensos a "overwash" ou outras perdas de sedimentos	Subestimação
Perfis com alto gradiente nas propriedades dos sedimentos	Sub/Sobrestimação

Para fazer face a algumas destas limitações, Hands (1980,1983) e Dean e Maurmeyer (1983) reformularam a Regra de Bruun tentando contabilizar a presença de ilhas barreira, gradientes do transporte de sedimentos pela deriva litoral e variações na granulometria dos sedimentos. Para o efeito, foi proposta a expressão da Regra de Bruun generalizada, apresentada na equação (3).

$$R = \frac{L+W}{P(B+h)} S + \frac{\frac{\partial Q_s}{\partial y}}{B+h} \quad (3)$$

O P representa a fração decimal da areia erodida da praia que é compatível com os sedimentos presentes na zona de rebentação, $\frac{\partial Q_s}{\partial y}$ é referente ao gradiente da deriva litoral e W é a largura da ilha barreira.

SCOR (1991), readapta a equação (3), com a aplicação a 3D em mente, considerando uma variável G_B , que é, no fundo, um balanço de sedimentos, considerando ganhos e perdas provenientes de rios/estuários, deriva litoral, “offshore” - “nearshore” entre outros. Resulta a equação (4).

$$R = \frac{LS + G_B}{P(B+h)} \quad (4)$$

De notar que para casos de ilhas barreira na linha de costa a equação (4) pode assumir a seguinte formulação, apresentada na equação (5).

$$R = \frac{(L+W)S + G_B}{P(B+h)} \quad (5)$$

A difícil contabilização quer do valor de P e de G_B , é um factor limitante à aplicação da Regra generalizada de Bruun.

1.3.5. VALIDADE/CRÍTICA À APLICAÇÃO DA REGRA DE BRUUN

A Regra de Bruun (1962) tem vindo a ser utilizada, como um padrão na abordagem à temática da erosão costeira face ao aumento do nível do mar. Não é, no entanto, consensual a sua validade. Desde à aplicação cega da regra, à utilização da mesma como referência, considerando as suas limitações, até à sua rejeição, a regra de Bruun tem estado, quase sempre, presente no que diz respeito à gestão costeira por todo o mundo.

A atratividade da simplicidade dos conceitos e da aplicação da regra, face aos modelos alternativos existentes, é talvez a mais óbvia justificação para o seu global sucesso. A validade da regra tem sido corroborada por diversos cientistas (Schwartz, 1965, 1967; Dubois, 1975; Hands, 1979, 1980, 1983; Rosen, 1978; Everts, 1985; Pilkey e Davis, 1987; Dean, 1990).

Contudo não está isenta de críticas, face aos seus pressupostos restritivos e aos vários casos de aplicação com resultados discordantes da regra.

SCOR (1991), atribui estas discrepâncias em relação à regra, a uma incerteza e erros na escolha dos parâmetros da equação e a um atraso na resposta dos perfis face à rápida variação do nível da água em alguns ensaios. Afasta assim a possibilidade de utilização desta regra para uma previsão precisa do fenómeno.

Talvez a maior crítica negativa à validade da regra é feita por Cooper e Pilkey (2004), que a rejeitam totalmente. Apresentam para esta rejeição razões como os idílicos pressupostos que não existem na natureza, a omissão de variáveis fundamentais e a dependência de relações erradas ou em desuso, como o conceito de profundidade de fecho.

Em defesa da Regra de Bruun (1962), poder-se-á referir que a mesma nunca foi entendida, pelo seu original autor como uma abordagem final e rigorosa do problema da erosão costeira e que a sua aplicação deve ser apenas utilizada, como que uma forma de balizar os valores do recuo da costa, tendo em atenção particularidades de cada caso de aplicação.

2

CARACTERIZAÇÃO SUMÁRIA DA COSTA

2.1. A COSTA PORTUGUESA

A caracterização sumária que se apresenta visa identificar tipologias de geomorfologias para efeitos de comparação com as que serviram de base à formulação de Bruun.

Com uma extensão de aproximadamente 943 Km, a costa Portuguesa (Portugal continental), apresenta uma grande variedade de perfis de praia, desde areais, com ou sem presença de rocha, com duna e sem dunas, a arribas. Existem sistemas geológicos como rias, estuários, promontórios (cabos) e baías. Todos estes exemplos, impõe problemas à aplicação da regra de Bruun (1962).

A acrescer a estas diferentes morfologias, há que considerar ainda a artificialização da costa. Estruturas aderentes com enrocamentos ou em betão, ou estruturas como esporões e quebramares, vão também influenciar a erosão costeira de uma forma não prevista pela regra.

Nos POCs, foram delimitadas faixas de salvaguarda, tanto para efeitos de erosão costeiro como de galgamento e inundação. As zonas costeiras com determinadas características físicas, graus de vulnerabilidade e horizonte temporal de exposição, são agrupadas em diferentes tipologias. Destacam-se as extensões costeira, classificadas como:

- Litoral baixo e arenoso;
- Litoral de arriba.

2.1.1. NORTE (CAMINHA-ESPINHO)

A região norte da linha de costa portuguesa é caracterizada por praias baixas e arenosas localizadas entre zonas com praias baixas e rochosas.

Nas zonas mais a norte a paisagem é mais acidentada influenciada pela existência da serra de Agra e da serra de Santa Luzia, em Caminha e Viana do Castelo. Nos concelhos da Póvoa de Varzim até Matosinhos, a paisagem é aplanada. Enquanto que no Porto e Vila Nova de Gaia a zona litoral tem inclinações suaves.

É um trecho da costa com elevada densidade populacional, ao nível nacional, com construção excessiva e algo desordenada, tendo como consequência a degradação das formações dunares acelerando e intensificando alguns problemas de erosão já verificados no século passado.



Figura 6- Praia do Sr. da Pedra, Arcozelo (Google Maps)

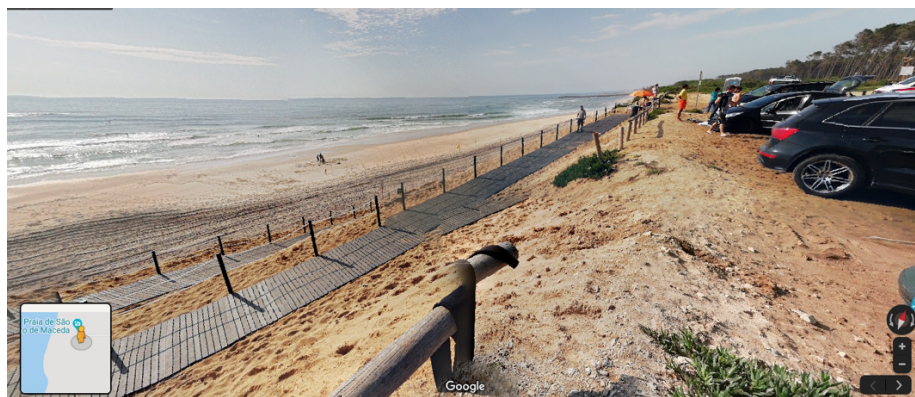


Figura 7- Praia de S. Pedro de Maceda, Maceda (Google Maps)

No exemplo da figura 6, praia do Sr. da Pedra, Arcozelo, é uma praia com um areal bastante espreado e com uma presença de afloramentos rochosos, como é frequente no norte do país. Enquanto que na figura 7, a praia de S. Pedro de Maceda, é um exemplo perfil de praia com duna e já sem afloramentos rochosos.

De destacar que Bruun, na sua regra não faz considerações a afloramentos rochosos, que são frequentes nesta zona.

2.1.2. CENTRO (OVAR- MARINHA GRANDE)

Este trecho da costa portuguesa é, com a exceção da serra da Boa Viagem (Figueira da Foz), uma planície baixa e bastante uniforme. É caracterizado por sedimentos maioritariamente arenosos, exemplificado pela Figura 8, da praia da Torreira. Existem, ainda alguns troços pontuais de formações rochosas (ex: Cabo do Mondego e promontório de Pedrogão, Figuras 9 e 10). As cotas baixas associadas a forte agitação marítima, contribuem para um risco de galgamento inerente a grande parte o troço em questão, tornando-o vulnerável aos efeitos de subida do nível médio do mar.



Figura 8- Praia da Torreira a norte do sistema lagunar de Aveiro(Google Maps)



Figura 9-Cabo do Mondego (Google Maps)



Figura 10- Promontório de Pedrogão (Google Maps)

2.1.3. TEJO E OESTE (ALCOBAÇA- CABO ESPICHEL)

A costa entre Alcobaça e o Cabo Espichel é um sistema costeiro heterogéneo, a Norte do Tejo caracterizado por arribas e praias encaixadas, como evidenciado na Figura 11 respeitante à praia da Nazaré, e a Sul por uma linha de costa baixa e arenosa, nomeadamente no concelho de Almada (Figura 12), que evolui gradualmente para um litoral de arriba.



Figura 11- Praia da Nazaré, a sul de arribas rochosas e do cânhão da Nazaré (Google Maps)



Figura 12- Praia da Fonte da Telha, a sul do estuário do Tejo (Google Maps)

A elevada atividade humana nesta zona costeira, contribui para uma menor afluência de sedimentos ao litoral, associada a agitação que induz um transporte sedimentar significativo, contribui para um défice sedimentar o que promove e acelera os efeitos erosivos, aumentando o risco de galgamento nas zonas de tipologia baixa e arenosa e de instabilidade nas de arribas.

É uma zona de elevada densidade populacional, com núcleos urbanos estabelecidos, tanto no cimo de arribas, como em zonas de cotas baixas, aumentando a sua vulnerabilidade face aos riscos acima referidos.

2.1.4. ALENTEJO (CABO ESPICHEL- ODECEIXE)

A linha de costa alentejana, pode ser dividida em duas secções, sendo a primeira a norte do Cabo de Sines e a segunda a sul. A norte do Cabo de Sines, e caracterizado por uma costa arenosa contínua, um arco entre o estuário do Sado e o referido cabo (Figura 13), suportada por sistemas dunares ou arribas brandas. A sul predomina um litoral de arriba rochosa (Figura 14), com praias encaixadas, protegidas da agitação marítima predominante.

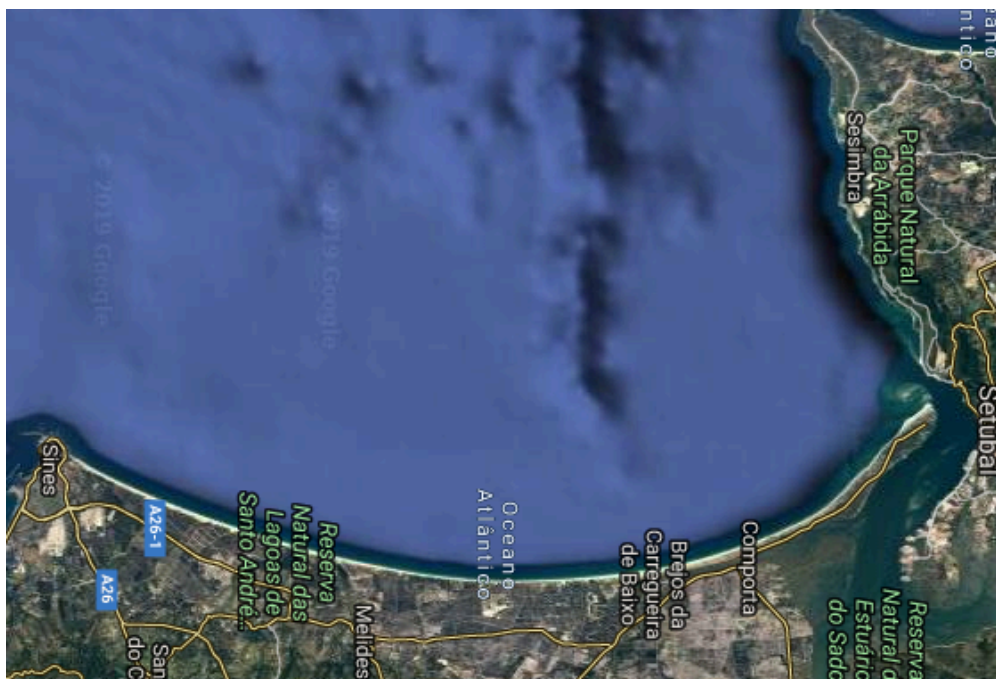


Figura 13- Arco arenoso entre estuário do Sado e Sines (Google Maps)



Figura 14- Praia da Azenha do Mar, Odeceixe (Google Maps)

2.1.5. ALGARVE (ODECEIXE- VILAMOURA)

A costa algarvia é algo heterogénea, sendo caracterizada por arribas rochosas, à semelhança do que acontece mais a norte na costa alentejana, com uma configuração mais ou menos linear e as mesmas praias encaixadas. A configuração das arribas entre o cabo de são vicente e Olhos de Água é uma mais recortada (Figura 15). No troço Olhos de Água- Vilamoura a costa mantém a sua tipologia de arriba, sendo estas de material brando e limitadas por praias arenosas (Figura 16).



Figura 15- Praia D. Ana (Google Maps)



Figura 16- Praia da Falésia (Google Maps)

2.1.6. ALGARVE (VILAMOURA-VILA REAL DE SANTO ANTÓNIO)

Nesta linha de costa é predominante uma tipologia de areal baixo, altamente suscetível a galgamentos. É exemplo a praia de Faro, Figura 17.



Figura 17- Praia de Faro (Google Maps)

2.2. FORMAÇÕES GEOLÓGICAS

A figura 18, apresenta exemplos de formações geológicas e a sua posição na linha de costa.

Acidentes litorais da costa continental portuguesa

Legenda:	
Cabos:	Outros acidentes litorais:
1 – Cabo Mondego	A – Ria ou “Haff Delta” de Aveiro
2 – Cabo Carvoeiro	B – Baía de São Martinho do Porto
3 – Cabo da Roca	C – Tómbolo de Peniche
4 – Cabo Raso	D – Estuário do rio Tejo
5 – Cabo Espichel	E – Estuário do rio Sado
6 – Cabo de Sines	F – Ria Formosa ou “Lido de Faro”
7 – Cabo de São Vicente	
8 – Cabo de Santa Maria	

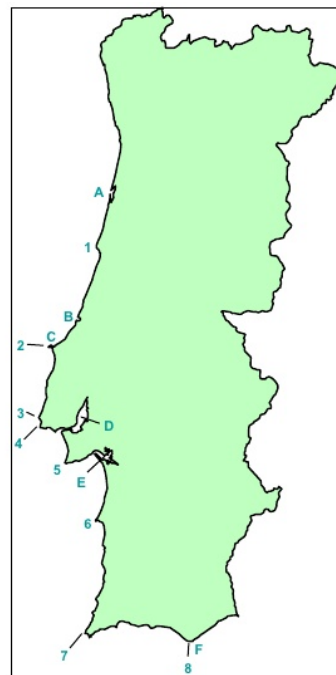


Figura 18-Algumas formações geológicas da costa Portuguesa

2.2.1. RIAS E ESTUÁRIOS

No sistema lagunar de Aveiro, figura 19 e 20, existe um depósito assinalável de sedimentos, tanto marinhos como fluviais. Estes “bancos” de sedimentos interferem no transporte transversal dos mesmos, alterando as previsões de perda e/ou ganho, estimadas pela aplicação da Regra de Bruun.

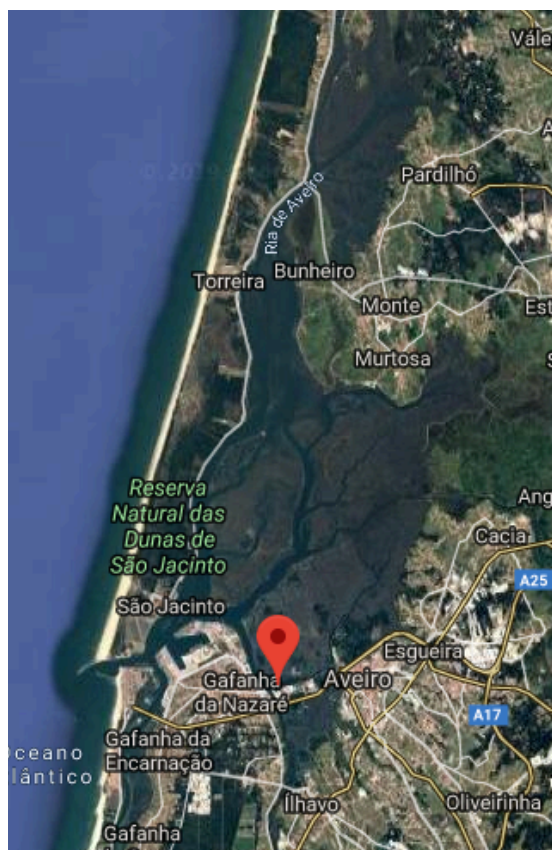


Figura 19- Ria de Aveiro, Vista satélite (Google Maps)



Figura 20- Ria de Aveiro (Google Maps)

De destacar ainda que nestes casos a presença de sedimentos não granulares, abona em detrimento da aplicabilidade da regra de Bruun (1962).

Existem outros exemplos na costa portuguesa, sistemas lagunares como, a Ria Formosa, figuras 21 e 22, e a Ria de Alvor, figuras 23 e 24.

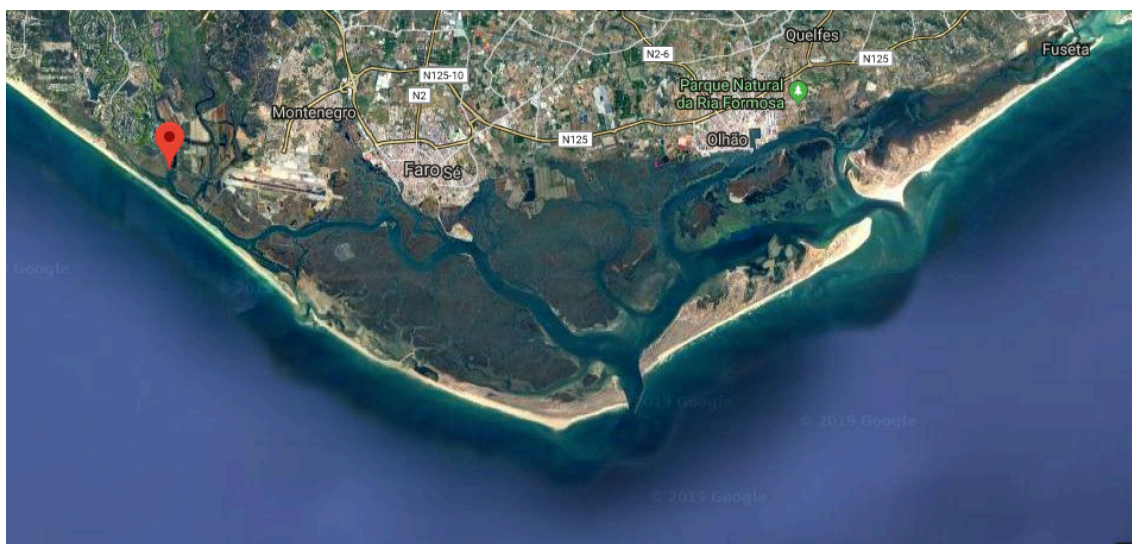


Figura 21- Ria Formosa, vista satélite (Google Maps)



Figura 22- Ria Formosa (Google Maps)

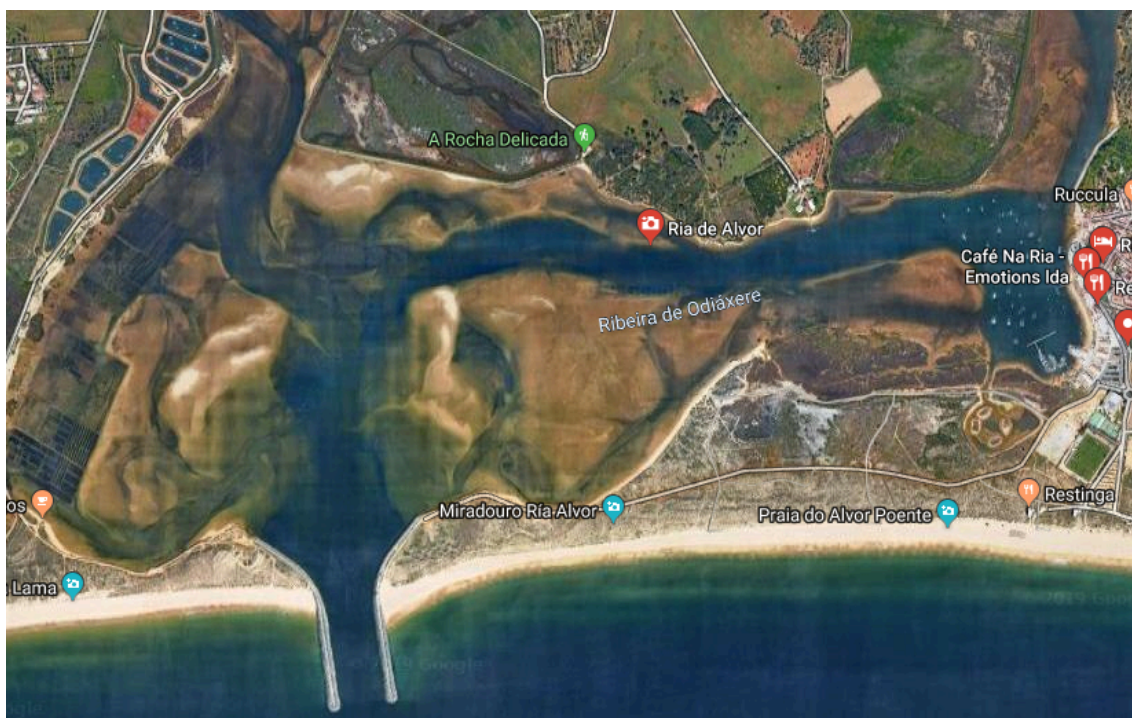


Figura 23- Ria de Alvor, vista satélite (Google Maps)

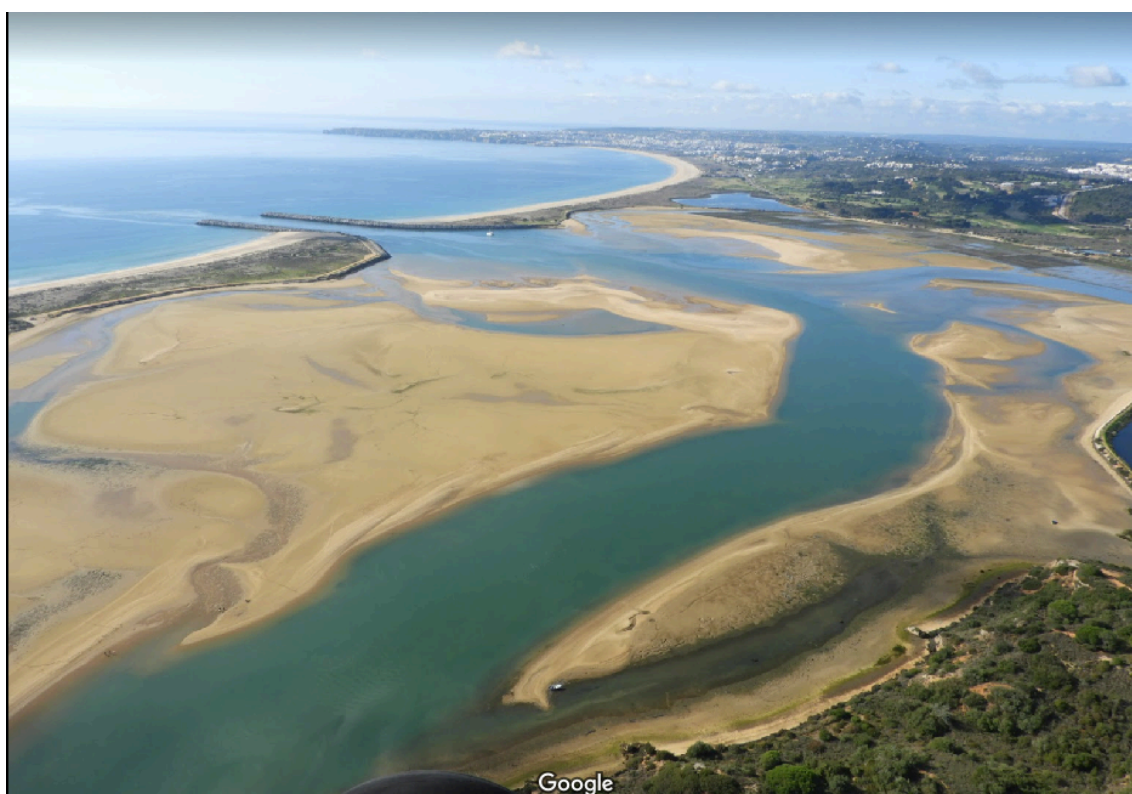


Figura 24- Ria de Alvor (Google Maps)

Como exemplo de estuários, apresentam-se, respetivamente nas figuras 25 e 26, o estuário do Tejo e nas figuras 27 e 28, o estuário do Sado. A semelhança dos sistemas lagunares, acima apresentados, existem sedimentos tanto marinhos, como fluviais.

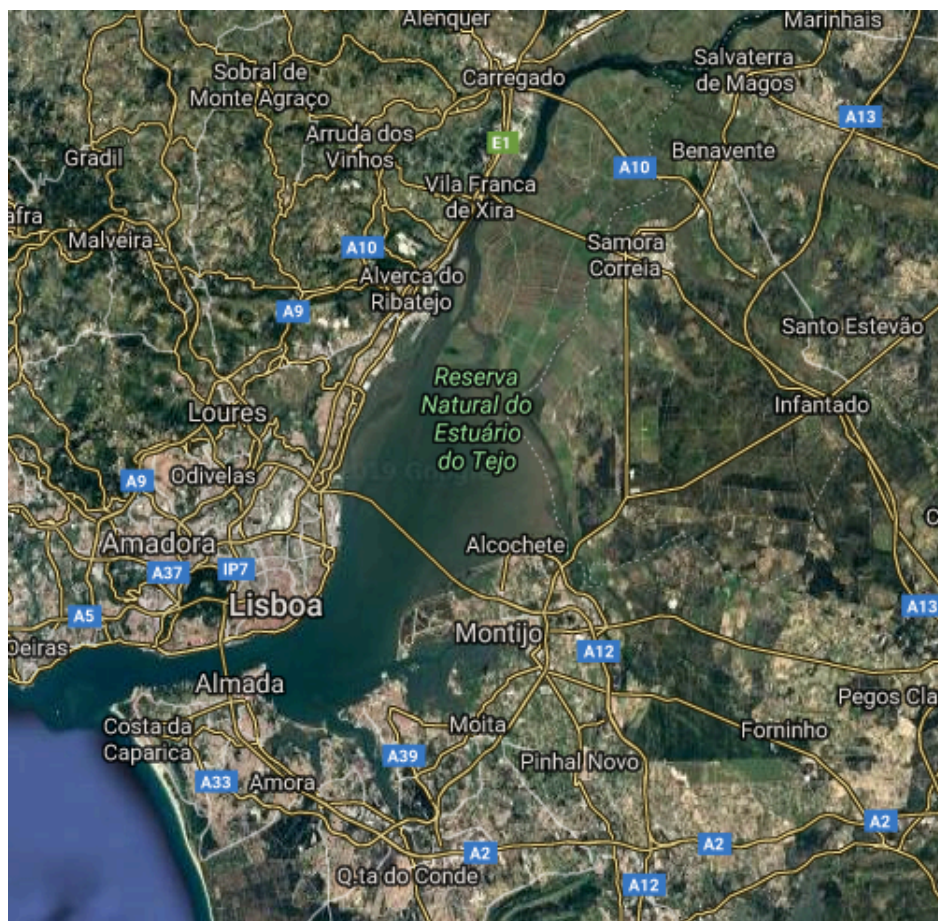


Figura 25- Estuário do Tejo, vista satélite (Google Maps)



Figura 26- Estuário do Tejo (Google Maps)



Figura 27- Estuário do Sado, vista satélite (Google Maps)



Figura 28- Estuário do Sado (Google Maps)

2.2.2. PROMONTÓRIOS/ CABOS

Nestas formações geológicas verifica-se de um destaque da linha da costa na direção do mar com efeitos tridimensionais, que não são considerados na regra de Bruun (1962), interferindo no transporte longitudinal de sedimentos ao longo da costa.

São formações geológicas comuns ao longo da linha da costa Portuguesa, sendo exemplos: Cabo Mondego, Cabo Carvoeiro, Cabo da Roca, Cabo Raso, Cabo Espichel (Figura 29), Cabo de Sines, Cabo de São Vicente e ainda Cabo de Santa Maria.



Figura 29- Cabo Espichel (Google Maps)

2.2.3. BAÍAS

Em oposição ao cabo, a baía é uma reentrância na linha da costa, ficando mais protegida, por efeito de fenómenos de difração, da ação marítima, onde são mitigados os efeitos tridimensionais provocados pela deriva longitudinal e pela ação oblíqua da ondulação. De destacar a Concha de S. Martinho do Porto, Figura 30 e 31, localizada em Alcobaça. Existem ainda outros exemplos como: Baía de Monte Gordo e Baía do Seixal.

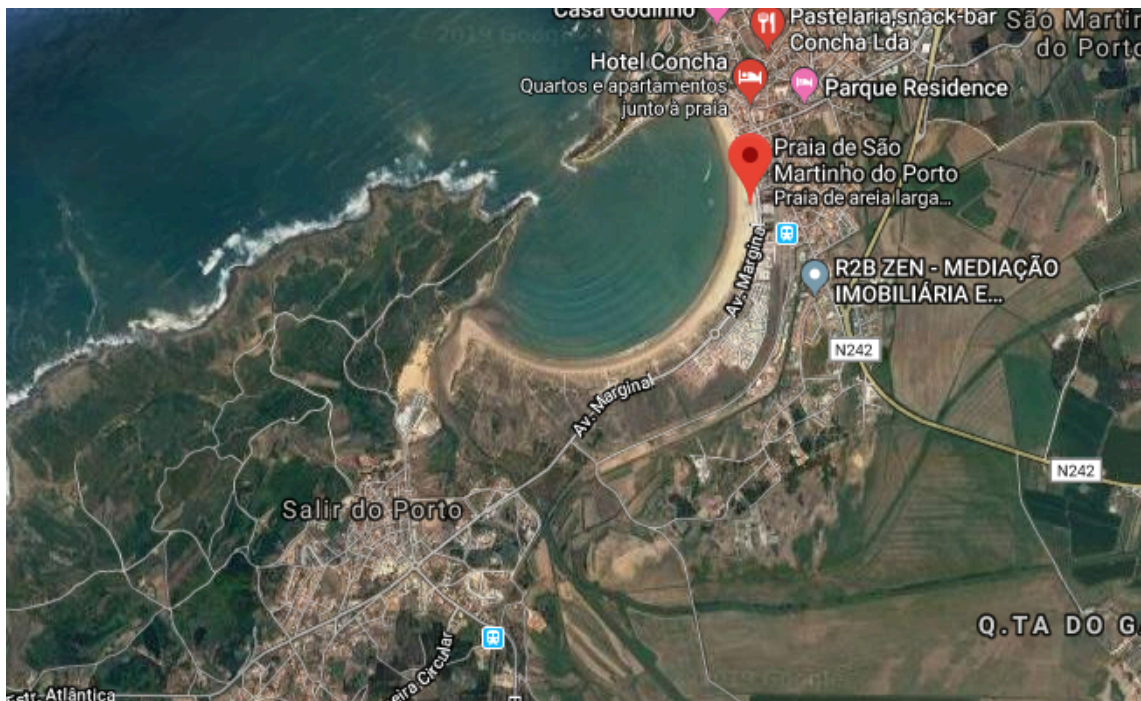


Figura 30- Concha de S. Martinho do Porto, vista satélite (Google Maps)



Figura 31- Concha de S. Martinho do Porto (Google Maps)

2.3. ARTIFICIALIZAÇÃO DA COSTA

2.3.1. ESTRUTURAS ADERENTES

São estruturas paralelas à costa, implantadas na linha de costa, com o objetivo de mitigar a ação direta da ondulação, galgamentos e/ou o recuo da linha de costa.

Existem várias configurações deste tipo de estruturas na costa Portuguesa, desde estruturas aderentes em enrocamentos, como na praia do Mindelo, Figura 32, estruturas de revestimento em betão e pedra, como na praia da Granja, Figura 33, e outras soluções. Servem basicamente o mesmo propósito e normalmente são soluções adotadas em locais onde existem infraestruturas em risco, como estradas, povoações, etc. A eventual instabilidade deste tipo de estrutura está normalmente relacionada com infraescavações, provocadas por uma maior ação erosiva na praia adjacente, por efeito da reflexão da agitação marítima. Outras soluções englobam, geocontentores ou geotubos com areia, cortinas de estaca-prancha, etc.



Figura 32- Estrutura aderente em enrocamento, Mindelo (Google Maps)



Figura 33- Revestimento em betão, Granja, S. Félix da Marinha (Google Maps)

2.3.2. ESPORÕES

São estruturas perpendiculares à costa, tendo como função a retenção dos sedimentos transportados pela deriva longitudinal, de forma a aumentar a praia, a barlar. Tem como consequência uma zona de maior erosão a sotamar do mesmo, uma vez que a reposição natural de sedimentos, por efeito da deriva é interrompido. Este fenómeno é ilustrado na Figura 34.

Dependendo ainda da sua forma/posição, põem em causa a aplicabilidade da regra de Bruun (1962), tanto por interromperem o transporte longitudinal de sedimentos, como o transporte transversal, quando paralelos à linha de costa.

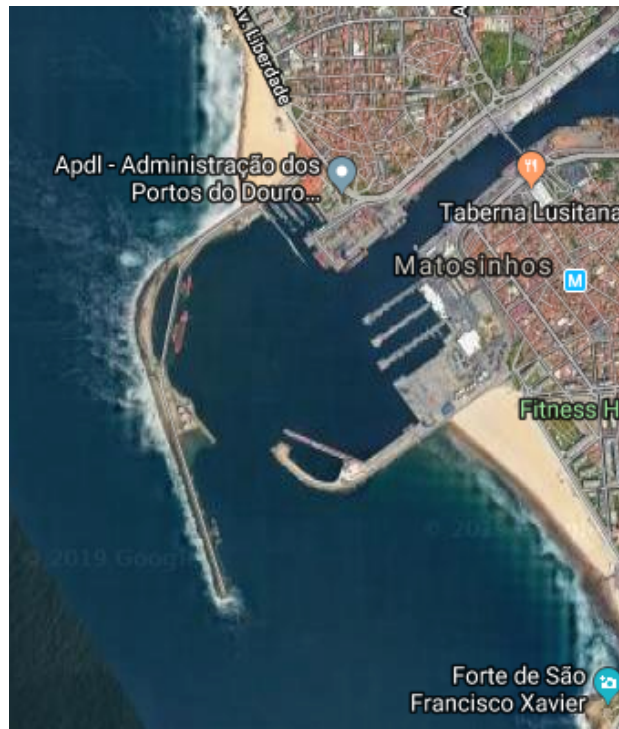


Figura 36-Quebramares ou molhes do Porto de Leixões (Google Maps)

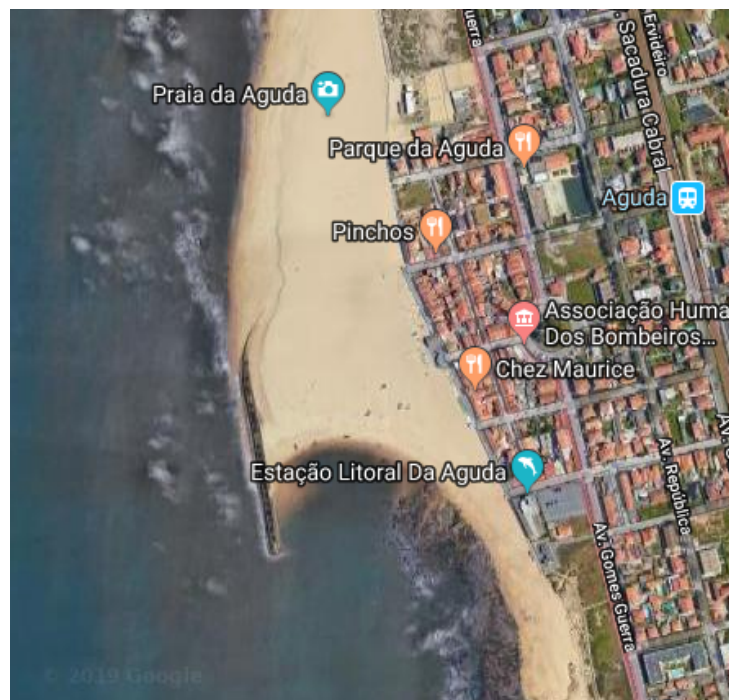


Figura 37- Quebramar destacado, Praia da Aguda, Arcozelo (Google Maps)

2.4. APLICAÇÃO DE BRUUN NA REALIDADE DA COSTA PORTUGUESA

A aplicação da regra de Bruun, está limitada, como referido no primeiro capítulo, a considerações de erosão em praias arenosas, tipificada na Figura 38, podendo estas ser mais ou menos espraçadas, com ou sem dunas mais ou menos pronunciadas.

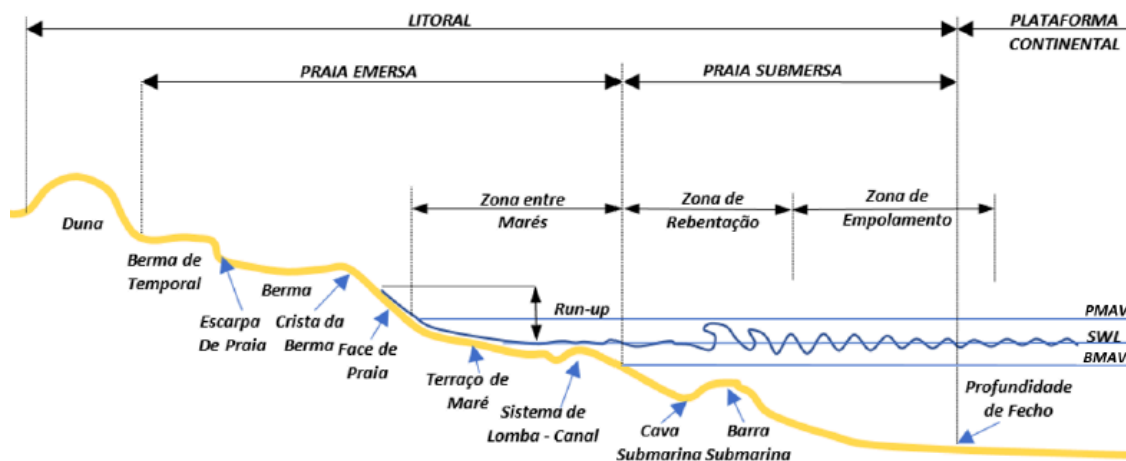


Figura 38- Nomenclatura adotada do zonamento da praia (<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html>)

Nas Figuras 39 a 41 está representado um perfil de uma praia arenosa natural, mais concretamente da Praia da Duna do Caldeirão, em Vila Praia de Âncora, a sul dos quebra-mares do portinho de Vila Praia de Âncora e da foz do rio Âncora.

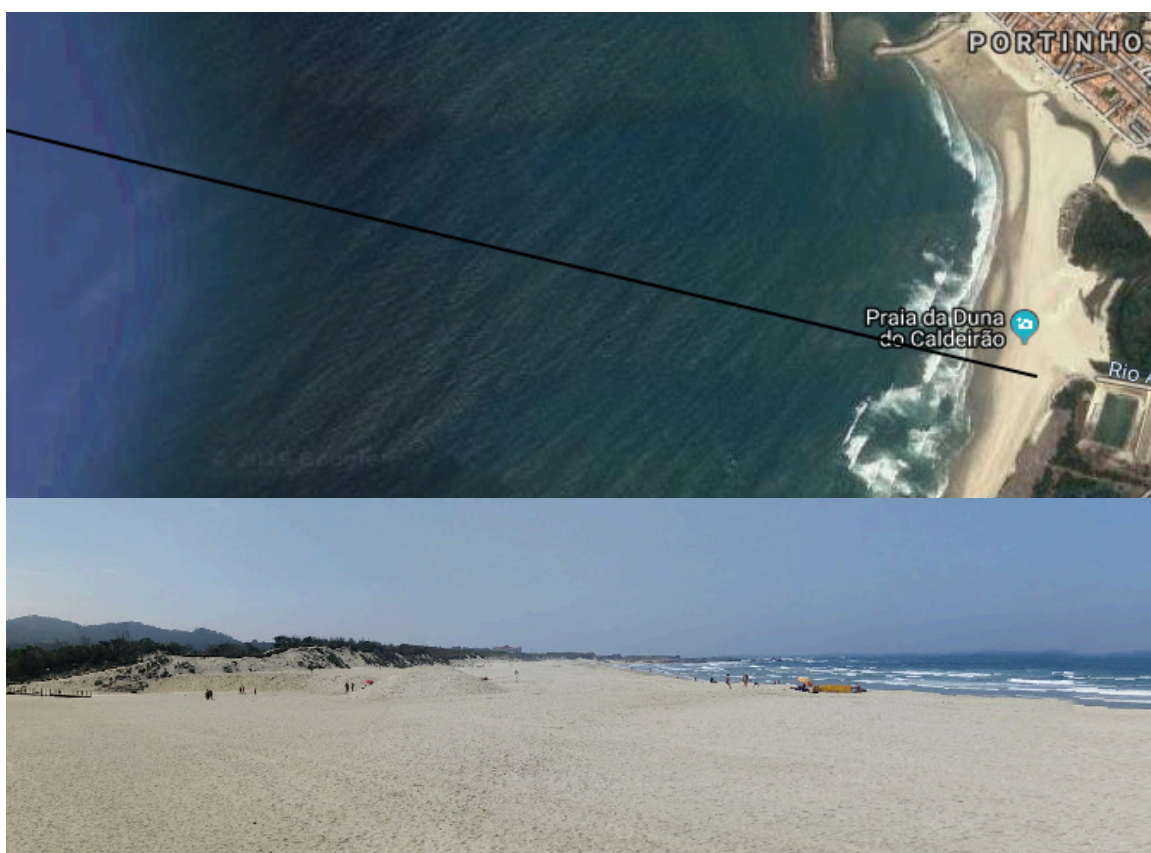


Figura 39- Praia da Duna do Caldeirão (Google Maps)

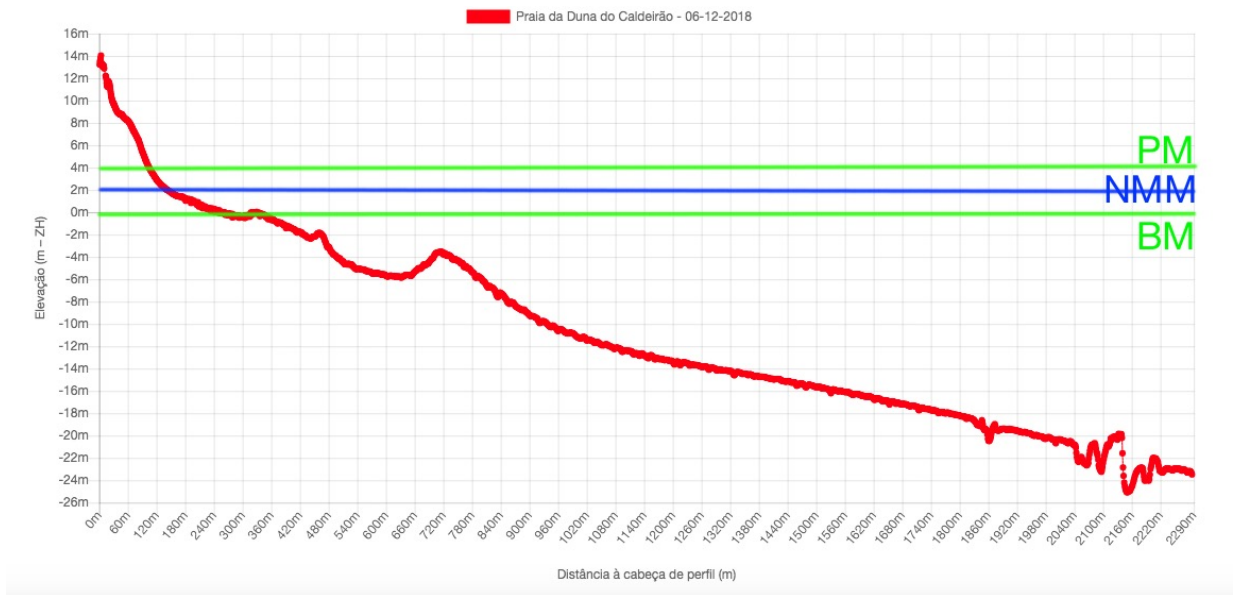


Figura 40- Perfil total da praia da Duna do Caldeirão (<https://cosmo.apambiente.pt>)

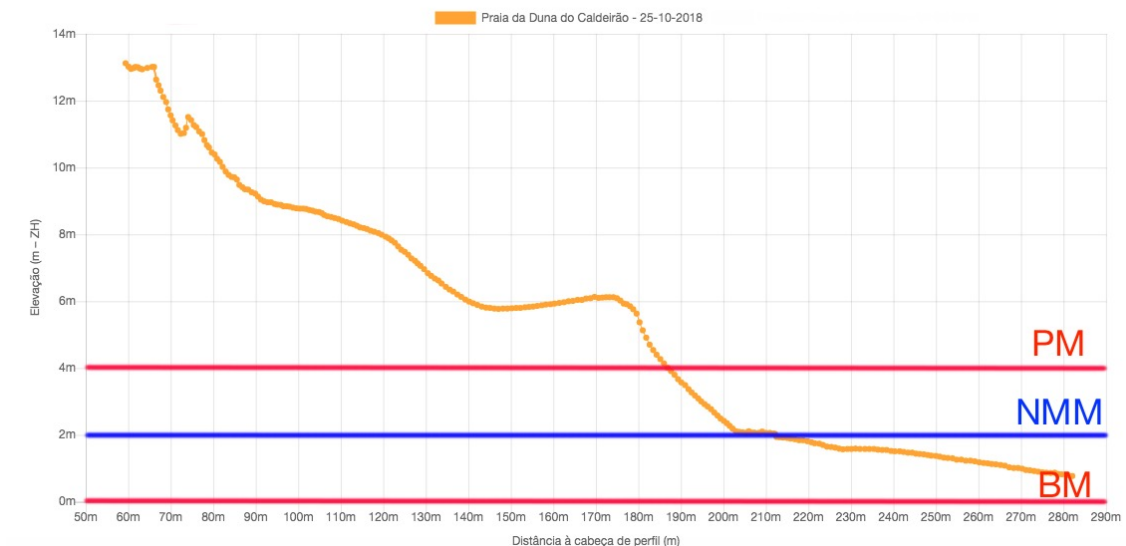


Figura 41-Perfil Emerso da Praia da Duna do Caldeirão (<https://cosmo.apambiente.pt>)

A grande dúvida que se levanta na discussão dos POCs, surge na aplicação da regra de Bruun, não só aos perfis de praia naturais, mas também aos perfis artificializados, não considerando os impactos que obras de proteção possam ter sobre as previsões de recuo por erosão.

As Figura 42e 43, referentes às zona do Monte Estoril, mostram uma estrutura aderente que consiste num talude de enrocamento e que artificializa todo o perfil.



Figura 42- Monte Estoril

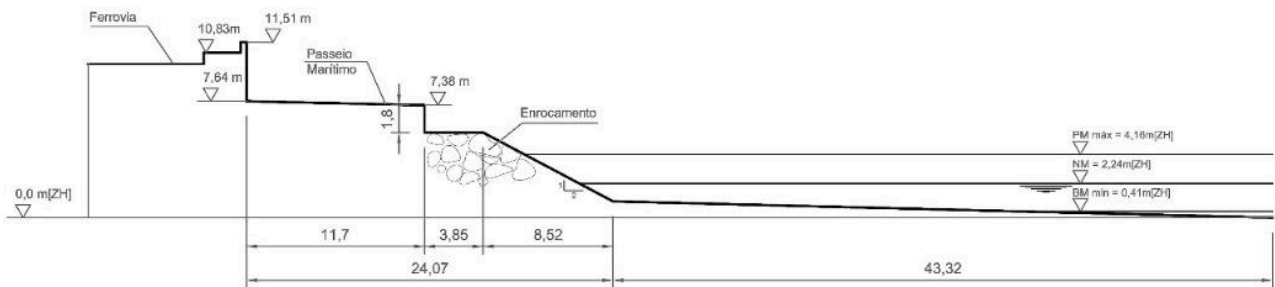


Figura 43-Perfil Monte Estoril

Um outro caso semelhante, que será o alvo do estudo prático deste trabalho é o enrocamento aderente no Mindelo (a apresentar no próximo capítulo).

Na Figura 44 é ilustrado uma obra de proteção vertical na zona mais posterior da praia, neste caso a praia de S. Pedro do Estoril.



Figura 44-Praia de S. Pedro do Estoril

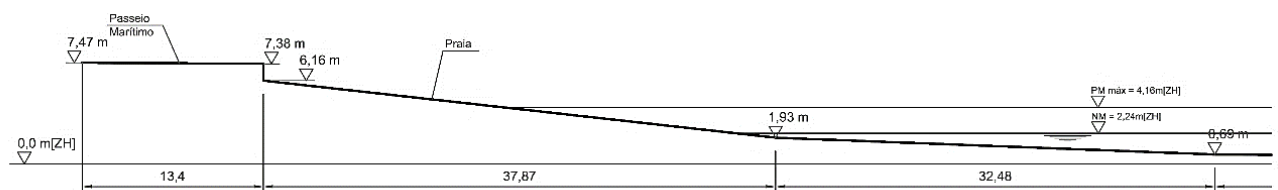


Figura 45- Perfil da Praia de S. Pedro do Estoril

3

MODELO

3.1. MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO MODELO

Uma vez que a regra de Bruun (1962) baseia-se numa teorização empírica, faz todo o sentido que de forma a tirar ilações sobre a aplicabilidade da mesma se recorra a ensaios práticos, assentes num modelo reduzido onde é possível isolar variáveis, alterar condições e acelerar os processos que na natureza demorariam anos a ser observados.

3.2. EQUIPAMENTO

3.2.1. TANQUE DE ONDAS

Os ensaios laboratoriais tiveram lugar no tanque de ondas da FEUP. O tanque de dimensões 28x12x1,2 m, apresentadas na Figura 46 é composto por 12 batedores (elementos de geração de ondas), o tanque propriamente dito, uma praia de dissipação e ainda uma cabine de controlo. No caso específico deste trabalho, apenas se recorreu a um dos batedores, uma vez que apenas foram alvo de análise os efeitos a duas dimensões. Para o efeito criou-se um canal de 0.8 m.



Figura 46- Tanque de Ondas da FEUP

3.2.2. SONDAS DE NÍVEL

A fim de registar as características da ondulação gerada, recorreu-se a três sondas de nível, afastadas do batedor 3.05m, na sua posição mais avançada e entre si de 1.30 m e 0.7 m e ainda a 3,9 m da linha de costa. Ao contrário de outros trabalhos em canal onde se utilizaram quatro sondas, neste caso, por se considerar suficiente e pela condicionante da janela de tempo para os trabalhos experimentais ser reduzida, de forma a simplificar o trabalho e a análise, foram apenas utilizadas três sondas. A limpeza das varetas das sondas e a calibração das mesmas foi efetuada todos os dias, antes de qualquer ensaio e, no caso da calibração, sempre que o nível da água se alterou.

As sondas podem ser vistas na Figura 47.

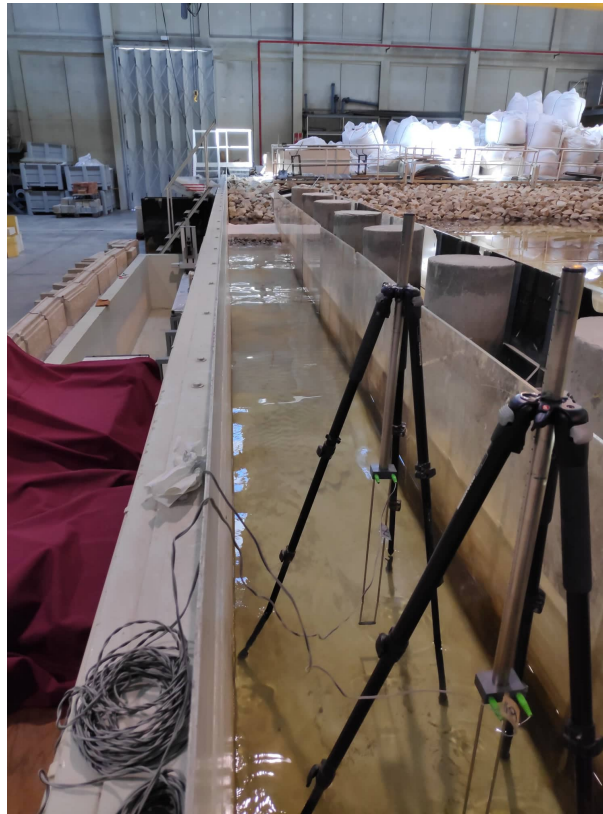


Figura 47- Sondas de Nível (2 de 3)

3.3. SEMELHANÇA DE ESCALA

3.3.1. ESCALA GEOMÉTRICA

A escolha da escala geométrica 1:30, foi determinada pelas condições do ambiente de ensaio, tentando minimizar a redução da dimensão do modelo face às dimensões do protótipo, mas ao mesmo tempo maximizar a representação do mesmo, no modelo, encaixando-o na janela de visionamento do tanque ondas.

De forma a preservar a relação 1:1 entre os eixos vertical e horizontal (sem distorção), teve de se limitar a extensão horizontal do modelo, que idealmente iria até à sua correspondente profundidade de fecho. O objetivo foi potenciar a significância das dimensões na parte emersa da praia, uma vez que a finalidade da experiência é a verificação do recuo da linha de costa e não tanto o transporte transversal de sedimentos, embora estes tenham relação.

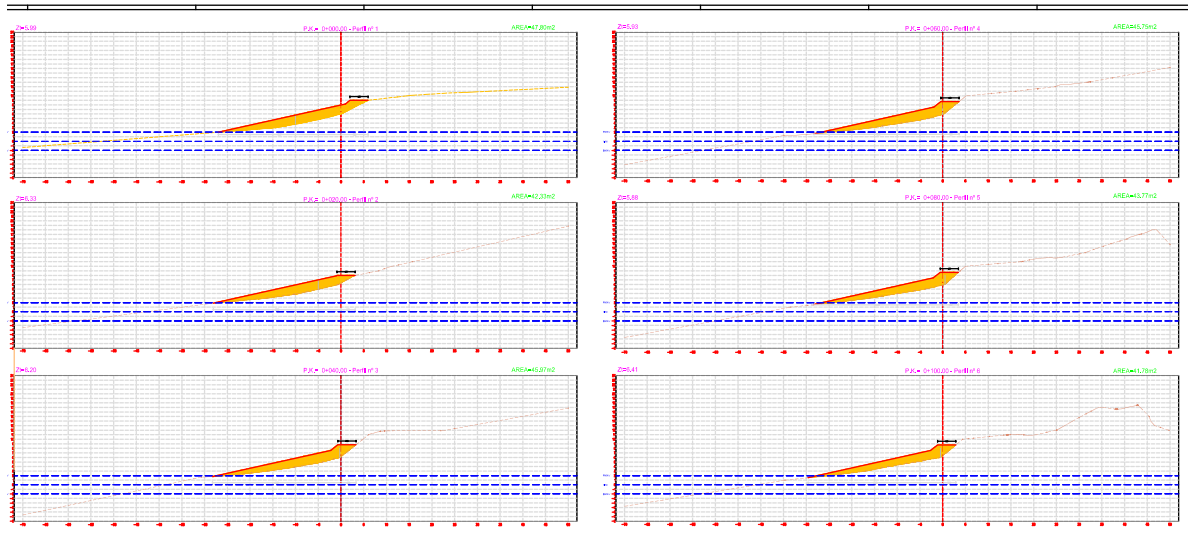


Figura 49- Secções transversais adjacentes ao perfil tipo, Mindelo (projeto FEUP, Veloso Gomes 2014)

A granulometria da areia utilizada no modelo, bem como a sua massa, não são afetadas pelas considerações de escala acima indicadas, uma vez que a redução para além de inviável, conduziria a efeitos de escala que contaminariam a análise dos resultados experimentais. Neste sentido, optou-se por recorrer a uma granulometria de um $d_{50}=0,3$ mm, que para além de ser a areia disponível, tem um histórico de utilização para experiências semelhantes, que corrobora a sua adequação.

No que diz respeito à parte submersa do perfil, foram adotadas as características consideradas no POC (Caminha-Espinho). São as características do perfil:

- Profundidade de fecho (não representada no modelo) = 15 m (-13 ZH)
- Inclinação (submersa) = 0,03
- Altura da duna = 10 m (+12 ZH)
- Largura do perfil ativo = 500 m

O nível médio das águas do mar (NMM) foi considerado +2 (ZH), como evidenciado na figura 50.

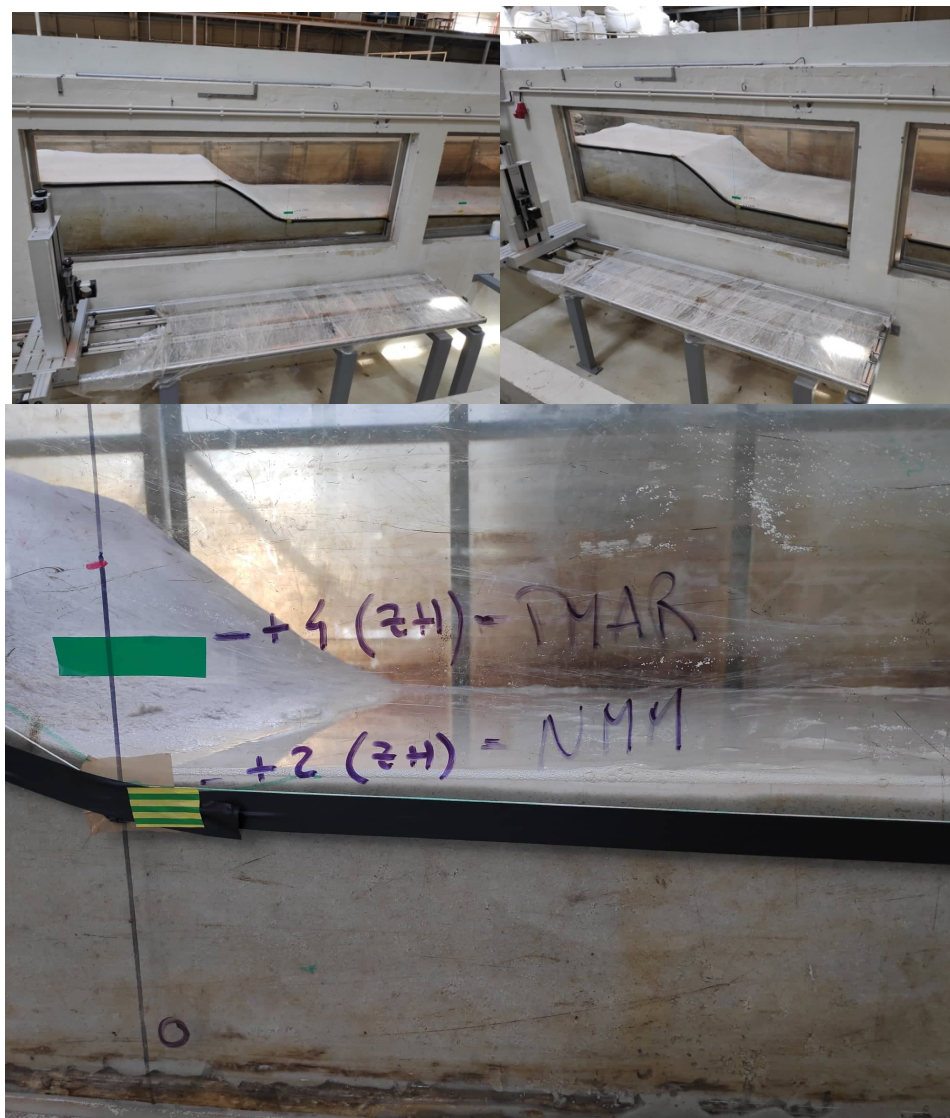


Figura 50- Modelo do Perfil Tipo

3.4.2. PERFIL COM ENROCAMENTO

Para este perfil utilizou-se a referência do mesmo perfil anteriormente referido, representando, desta vez, no modelo, a estrutura aderente de proteção costeira, que foi aplicada no exemplo real.

As características que diferem do perfil tipo, para além da estrutura aderente é apenas a cota de coroamento, que passa a estar nos +10.5 m (ZH). A estrutura aderente consiste num manto de duas camadas, onde a camada inferior é composta por um enrocamento com massa compreendida entre as 2 Ton e 4 Ton, que no modelo são 0.059 Kg a 0.119 Kg, e por uma camada superior de massa entre as 4 Ton e 6 Ton, no modelo 0.119 Kg a 0.178 Kg. Ainda existe uma subcamada de regularização em TOT, para a qual foi utilizada uma brita de pequenas dimensões.

Optou-se pela não utilização da manta geossintética, uma vez que era impossível reduzi-la à escala e afetaria de forma comprometedora o comportamento da estrutura. A implantação no modelo é apresentada na figura 51.



Figura 51- Etapas de construção do Modelo com estrutura aderente; TOT- cima esquerda, camada inferior-cima direita, camada superior-baixo

4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1. ENQUADRAMENTO DA EXPERIÊNCIA

A componente experimental deste trabalho teve como objetivo, analisar o impacto de uma estrutura de defesa costeira aderente, no que diz respeito às previsões do recuo da linha de costa face a uma previsível subida do nível da água do mar, apoiadas na aplicação da Regra de Bruun (1962).

Para o efeito foi, como já referido no capítulo anterior, recorreu-se a uma modelação física que consistiu na construção de dois modelos de um mesmo perfil de praia, apoiados num exemplo real da costa Portuguesa, que apresentava condições favoráveis a aplicação da regra.

O primeiro modelo é representativo de um perfil natural, que se apelidou de “perfil tipo”, funcionando como elemento de controlo. Foi submetido a diferentes regimes de ondulação, e a uma subida do NMM (nível médio do mar), voltando a testar diferentes regimes de energia. Os ensaios decorreram até se verificar uma estabilização do perfil.

De seguida repetiram-se as condições de ensaio no segundo modelo, este já munido de uma estrutura aderente, já descrita.

4.2. CONDIÇÕES DE ENSAIO

Ao longo desta experiência, para cada um dos modelos, foram considerados dois regimes de energia.

Para o efeito utilizou-se a tabela 2, que é um sumário de uma análise estatística levada a cabo por Coelho (2005), relativa às alturas significativas e respetivos períodos de onda registados em Leixões. Um primeiro regime diz respeito a um regime de ondulação muito frequente com alturas significativas de cerca de 2 m e períodos de onda à volta de 8 s.

O segundo regime é um regime mais extremo tentando simular uma tempestade, ainda assim com uma incidência algo frequente, com alturas significativas de 4 m e períodos de 11 s. Esta agitação foi replicada em cada um dos perfis, duas vezes, uma vez por cada NMM considerado. Inicialmente o nível médio do mar foi considerado +2 m(ZH) e numa segunda fase +4 m(ZH). Este aumento, representa a subida prevista, no POC caminha- Espinho, para o NMM num horizonte de 200 anos, valor que não foi alvo de análise nem crítica neste trabalho.

Tabela 2- Registo do número por classes de alturas significativas de onda e respetivos períodos com base nos registos na boia oceanográfica de Leixões entre 1981 e 2003 (Coelho 2005)

	≤ 0.5	0.5-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Σ
≤ 4	9	6									15
4-5	18	219									237
5-6	63	1008	198								1269
6-7	69	2006	761	17							2853
7-8	70	2246	1094	158	3						3571
8-9	19	1952	1472	368	42						3853
9-10	5	1454	1549	627	150	45					3830
10-11		897	1374	727	253	112	23				3386
11-12	1	423	1047	711	333	262	63	8			2848
12-13		134	476	471	320	322	135	22	2		1882
13-14		21	140	240	202	242	148	74	10	2	1079
14-15		4	24	71	98	199	80	50	23	8	557
15-16		2	12	20	20	96	44	17	12	5	228
16-17			5	4	5	17	36	5	6	3	81
> 17			2	3	1	4	8	1			19
Σ	254	10372	8154	3417	1427	1299	537	177	53	18	25708

Na tabela 3, estão identificados os ensaios levados a cabo, bem como evidenciadas as diferenças relativas à ondulação que se pretendeu gerar e à que se verificou. A ondulação gerada foi sempre regular, uma vez que os efeitos que se pretenderam simular são de longa duração.

Ainda de destacar o ensaio A2.2, assinalado a amarelo na tabela 3. A título de curiosidade, fez-se variar a altura significativa sem alterar o período. Foram apenas necessários 10 min para concluir que o perfil não sofria qualquer alteração e o ensaio foi dado como nulo.

Tabela 3- Resumo dos ensaios realizados

Ensaio	Perfil	NMM (m;ZH)	Hs teórico (m)	Hs méd. (m)	Δ	THs teórico(s)	Dur. (min)
A1	perfil tipo (areia)	2	2	2,5	0,5	8	60
A2.1 (A)	perfil tipo (areia)	4	2	2,6	0,6	8	60
A2.1 (B)	perfil tipo (areia)	4	2	2,5	0,5	8	30
A2.2	perfil tipo (areia)	4	3	3,1	0,1	8	10
A2.3 (A)	perfil tipo (areia)	4	4	3,4	-0,6	11	60
A2.3 (B)	perfil tipo (areia)	4	4	4,0	0,0	11	60
B1	estrutura aderente (enrocamento)	2	2	2,5	0,5	8	30
B2.1	estrutura aderente (enrocamento)	4	2	2,1	0,1	8	90
B2.2	estrutura aderente (enrocamento)	4	4	3,2	-0,8	11	120
B3.1	estrutura aderente (enrocamento)	6	2	2,5	0,5	8	90
B3.2	estrutura aderente (enrocamento)	6	4	3,8	-0,2	11	120

Ainda relativamente à tabela 3, de notar que tanto os ensaios A2.1 como A2.3 estão divididos em 2 fases, a razão pelo qual isto acontece, é que se achou conveniente prolongar o ensaio, uma vez que o perfil não transmitia com certeza estar estabilizado ao fim do tempo inicialmente estipulado.

O ensaio B3.1 e B3.2, foi um ensaio extra onde se eleva o nível do mar a uma cota, muito extrema, de +6 m (ZH), de forma a provocar efeitos destrutivos na estrutura. Não é alvo de comparação com o perfil tipo, uma vez que este não foi ensaiado nessas condições.

4.3. RESULTADOS E ANÁLISE

4.3.1. ENSAIO A1

Ao fim de 1 h de ensaio o perfil é virtualmente não afetado na sua parte emersa, tirando a formação de uma pequena curva de “remate” na inflexão com a sua parte submersa, figura 52, esta, por sua vez, apresenta, ainda que ligeiras, algumas alterações, como rugas no leito, figura 53 e uma pequena baixa no fundo na zona de rebentação, figura 54.

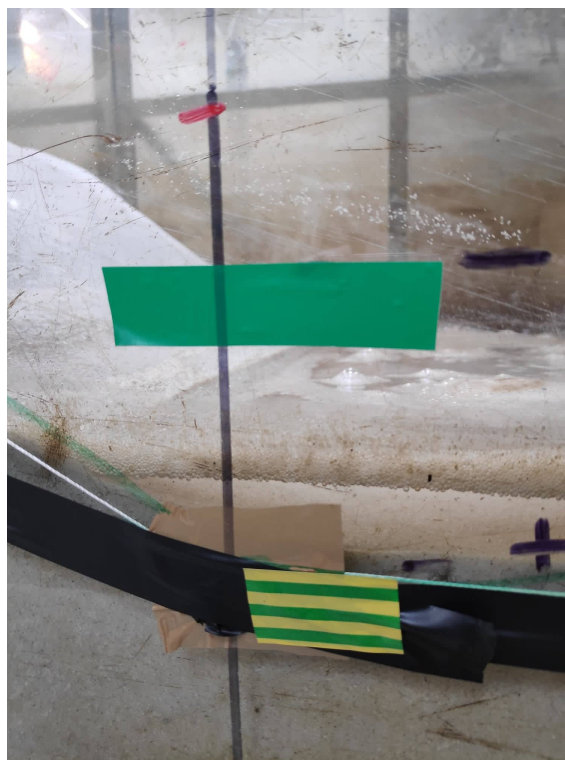


Figura 52- Curva de "remate" no ensaio A1



Figura 53- Rugas na parte submersa do perfil no ensaio A1

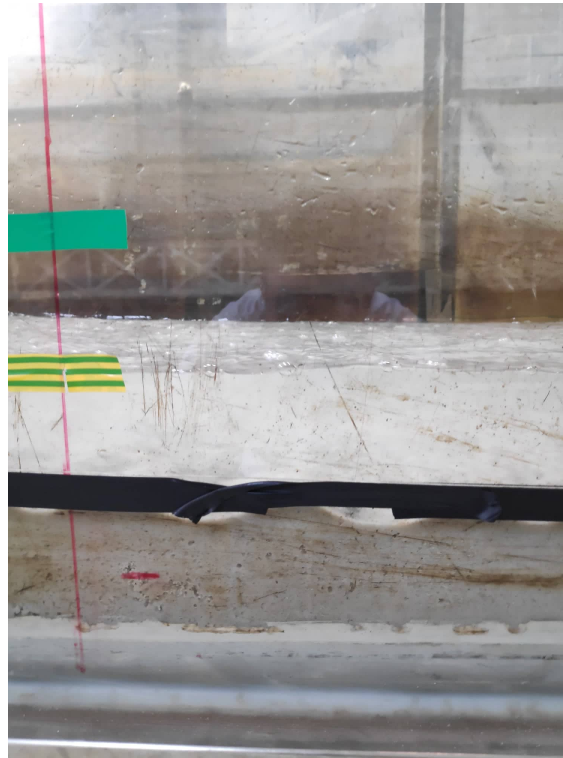


Figura 54- Ligeira depressão no fundo na zona de rebentação

4.3.2. ENSAIO A2.1

Mantendo a mesma agitação, apenas variando o NMM para os +4 m (ZH), já se fazem notar efeitos de erosão, e no fim do ensaio existe no modelo um recuo no talude de 9,22 m, à escala real se bem que são notórios sinais de instabilidade da parte superior da praia, figura 55. Verifica-se ainda na zona de espraçamento, até $z=7$ m, uma suavização de inclinação do talude, que passa a ter sensivelmente 15° , figura 56. No que toca à parte submersa da praia é de destacar a acumulação de sedimentos numa barra paralela à linha de costa, figura 57.

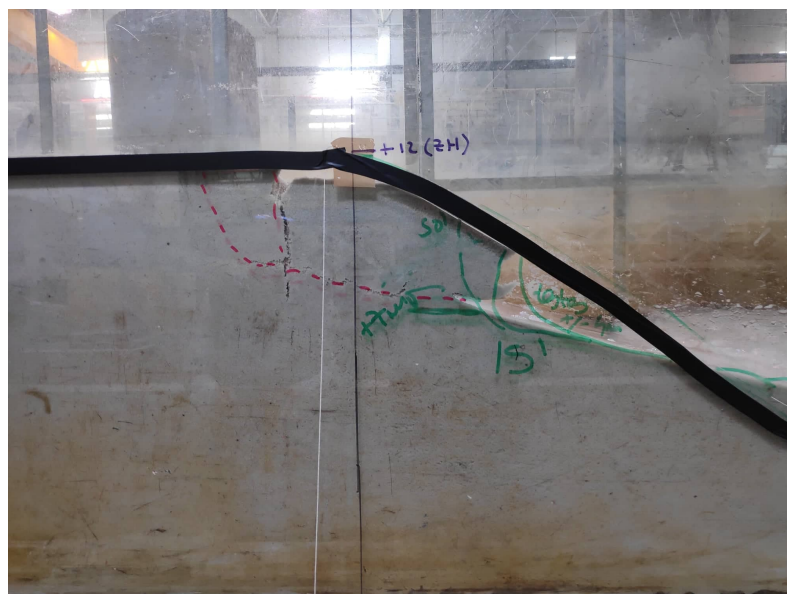


Figura 55- Instabilidade da parte superior da praia no ensaio A2.1



Figura 56- Suavização da inclinação da praia no ensaio A2.1

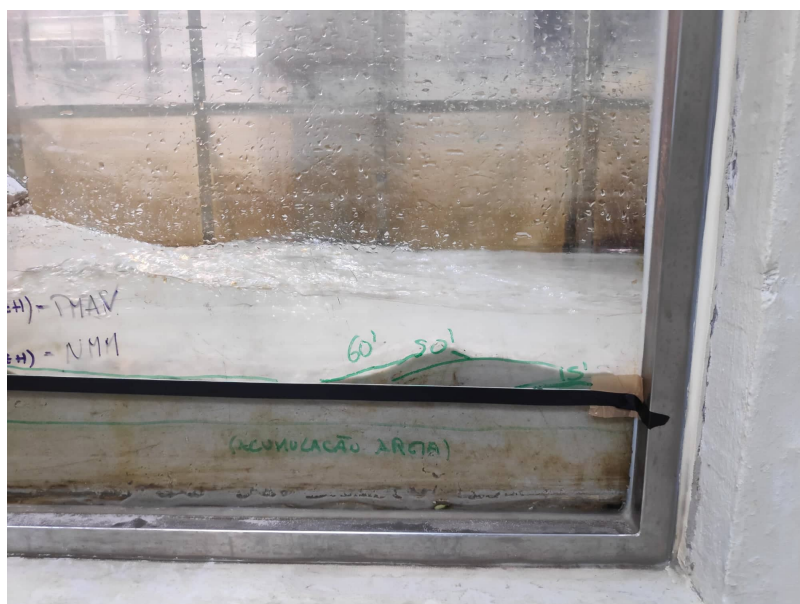


Figura 57- Formação de uma barra de sedimentos longitudinal no ensaio A2.1

4.3.3. ENSAIO A2.3

Este ensaio altera a agitação, maior altura significativa um período mais longo, resultam num aumento de energia que pode ser associado a uma tempestade. O espraçamento passa da cota dos 7 m para os 8,2 m, mas a inclinação do talude mantém-se nos 15° sensivelmente e vai-se elevando de forma paralela, à medida que a parte superior a praia é erodida, figura 58. A parte superior da praia acaba por colapsar ao fim de 1 h de ensaio, figura 59, resultado da erosão por infraescavação. A suavização da inclinação da parte emersa da praia acaba por resultar num afastamento da zona de rebentação e, por conseguinte, também da barra longitudinal, figura 60.

No final das 2 h de ensaio, o recuo verificado no modelo, convertido à escala real, é de 10,4 m.

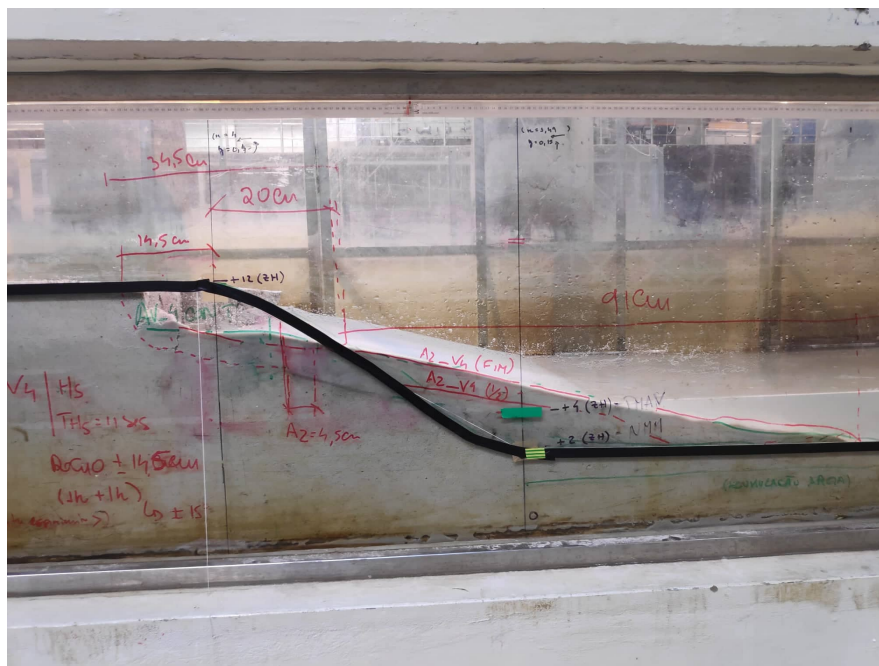


Figura 58- Elevação do talude mantendo a mesma inclinação no ensaio A2.3

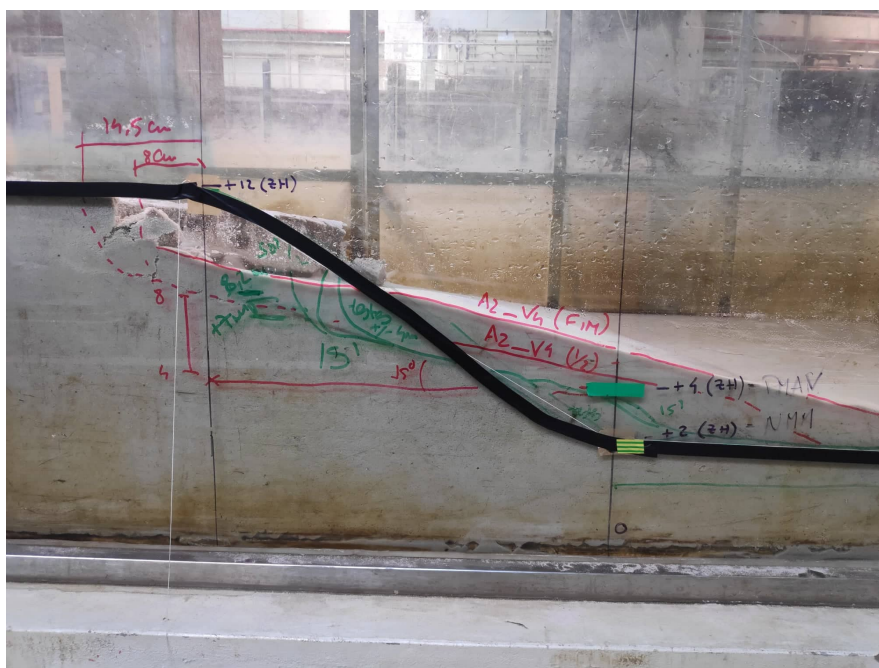


Figura 59- Colapso da parte superior da praia

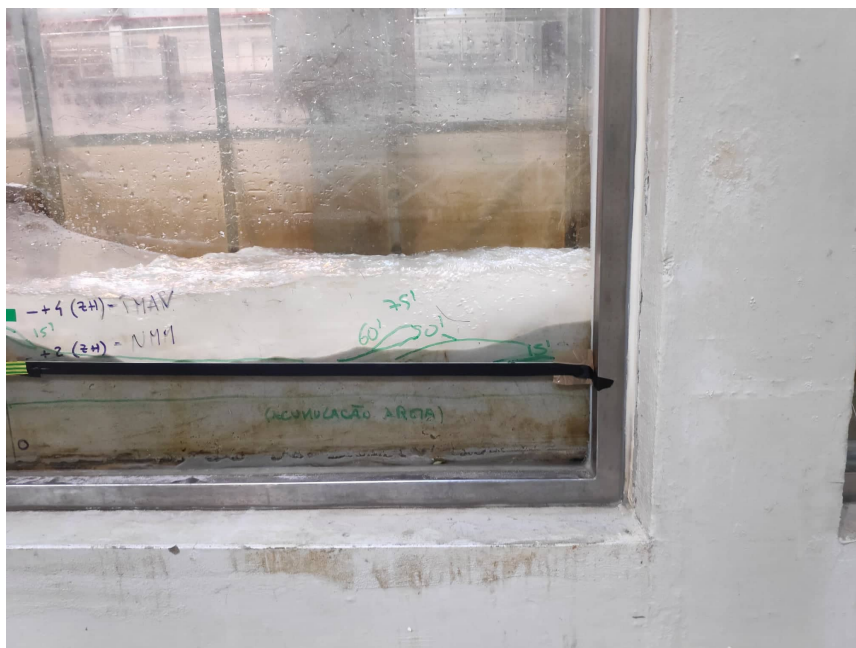


Figura 60- Recuo da barra longitudinal

Também é importante salientar alguns efeitos tridimensionais, evidenciados na figura 61, que já se verificavam, apesar de com pouca expressão no ensaio A2. Estes podem ter causas várias, como efeitos de parede ou mesmo diferenças na compactação da areia.



Figura 61- Efeitos 3D

4.3.4. ENSAIO B1

O ensaio foi interrompido a meio, por ser óbvio que, para o mesmo regime de agitação e NMM que não surtiu efeito no perfil natural, também não iria haver desenvolvimento para o perfil munido do enrocamento.

4.3.5. ENSAIO B2.1

Este ensaio deixa algumas dúvidas que ficaram por responder, uma vez que não foi possível repetir o ensaio por constrangimentos temporais. Existe uma erosão da areia que se encontra por baixo do enrocamento, figura 62, o que provoca um assentamento do mesmo, como se pode ver na figura 63. Contudo, apenas se verifica esta ocorrência, numa zona pontual, encostada à janela de visualização, deixando a dúvida quanto ao papel do efeito da parede no modelo.



Figura 62- Infraescavação por efeito de parede no ensaio B2.1

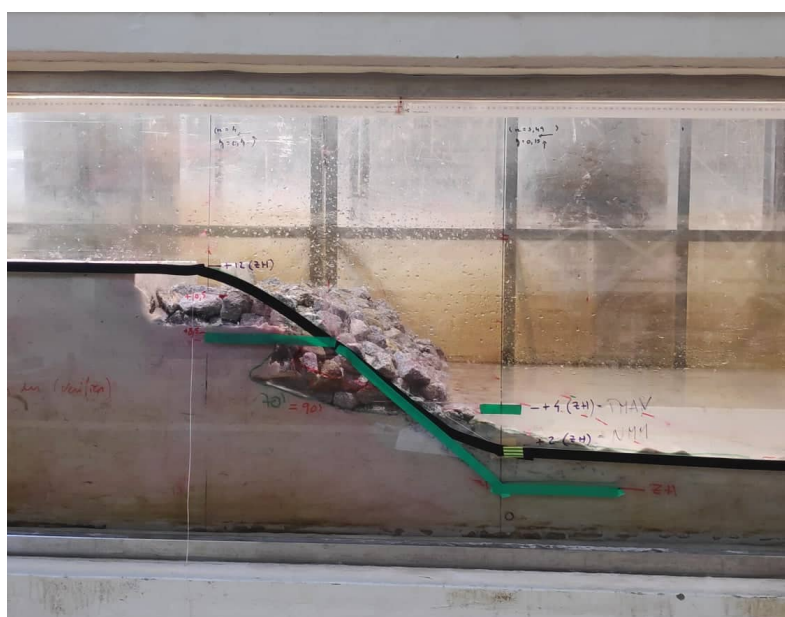


Figura 63- Assentamento pontual da estrutura de proteção no ensaio B2.1

4.3.6. ENSAIO B2.2

As dúvidas do ensaio anterior persistem neste também, uma vez, que tal com demonstra a figura 64, a única diferença está no alcance do espraimento que provoca um avanço na erosão, acabando por também ser pontual no junto da parede.

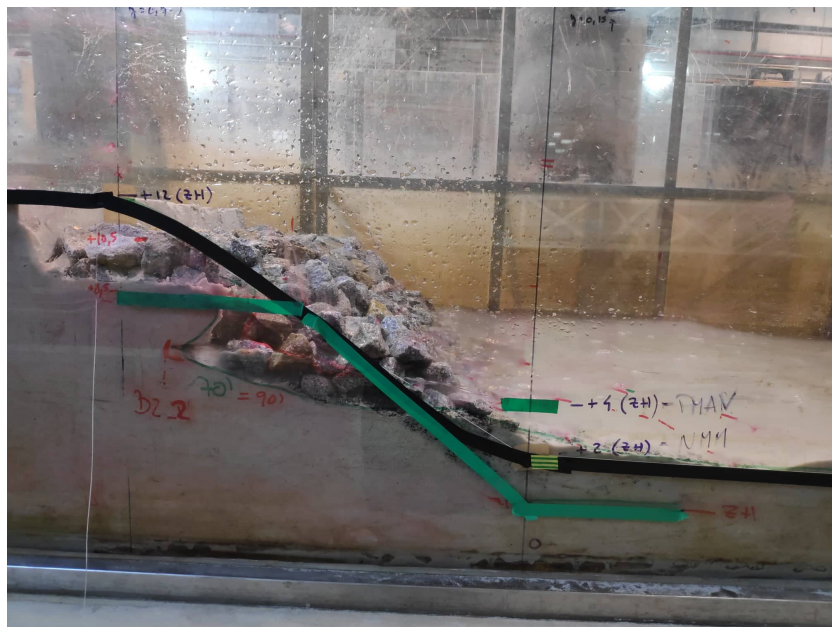


Figura 64- Ensaio B2.2

4.3.7. ENSAIO B3.1

No caso deste ensaio, já se torna evidente a ação erosiva, uma vez que, à semelhança dos casos do perfil natural, a inclinação do talude também alivia para cerca de 9° , figura 65. Também se verifica uma acumulação de sedimentos no pé do talude à medida que este se vai elevando. O recuo não é significativo.

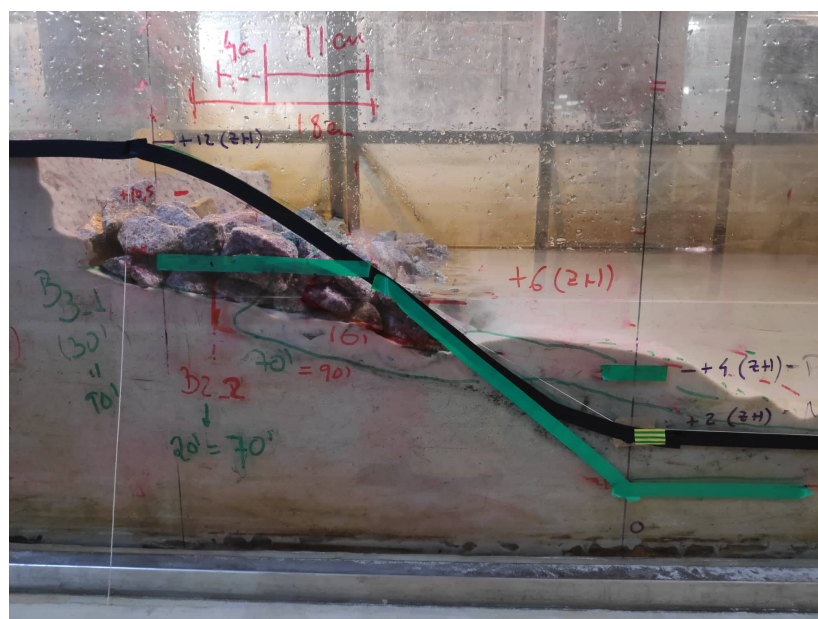


Figura 65- Ensaio B3.1

4.3.8. ENSAIO B3.2

Neste ensaio existe galgamento da estrutura, o que resulta numa elevada e rápida erosão da parte do perfil não protegido, onde a praia acima da estrutura tinha um paramento vertical e passa agora a ter 19° de inclinação, figura 66. Também se verifica um mais acentuado suavizar da inclinação da parte protegida pela estrutura, evidenciado por uma maior acumulação de sedimentos, no pé do talude, figura 67.

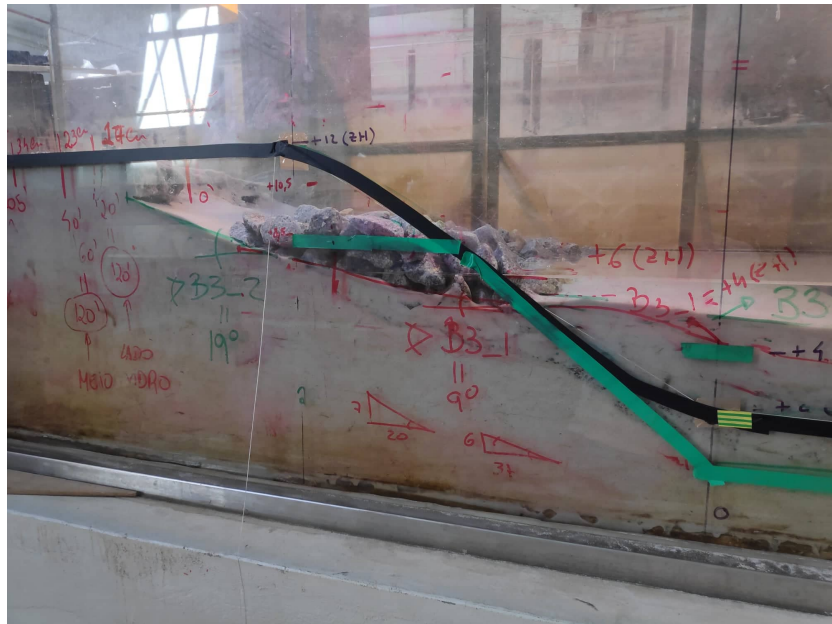


Figura 66- Inclinações no Ensaio B3.2

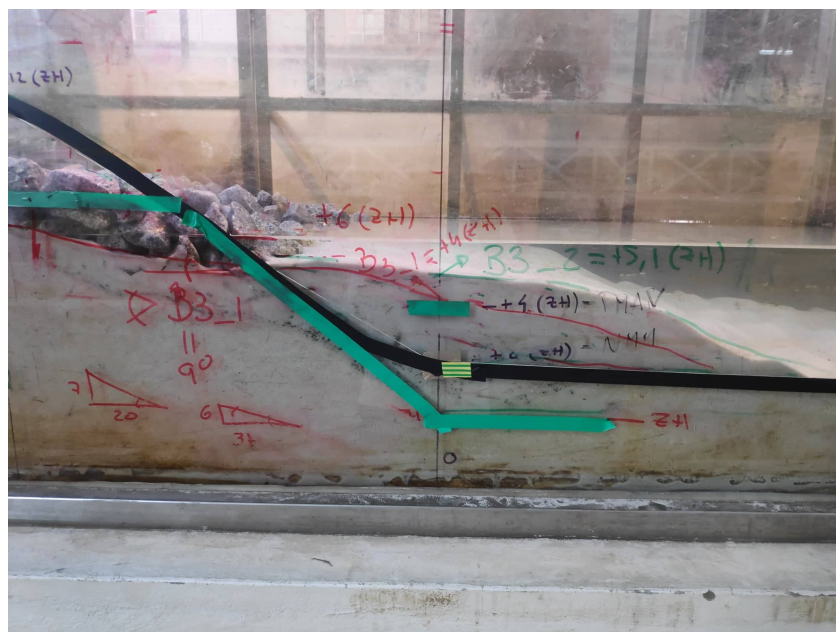


Figura 67- Acumulação de sedimentos no pé do talude no ensaio B3.2

Ainda é importante destacar o agravamento dos efeitos tridimensionais, figura 68 e 69. Tendo em conta estes efeitos e considerando para o efeito de recuo o ponto médio, este equivale à escala real, a 7 m



Figura 68- Efeitos tridimensionais no ensaio B3.2 (vista de cima)

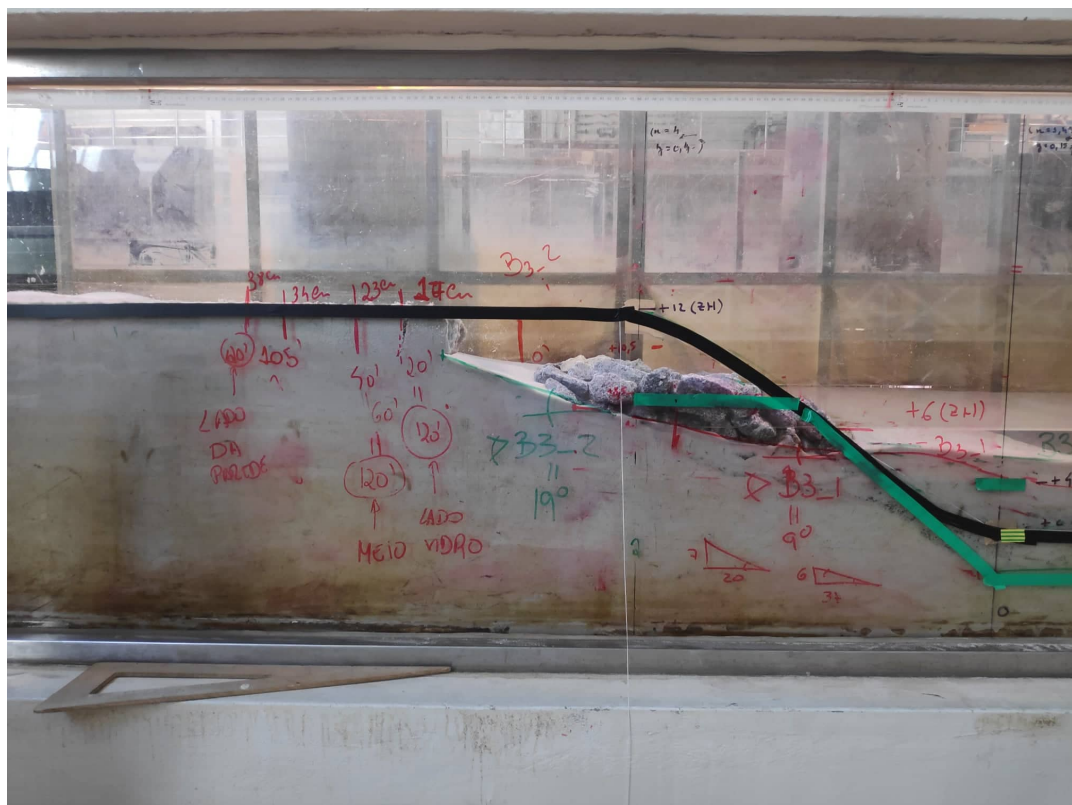


Figura 69-Efeitos tridimensionais no ensaio B3.2 (alçado)

4.4. RESUMO GRÁFICO DAS SÉRIES DE ENSAIOS

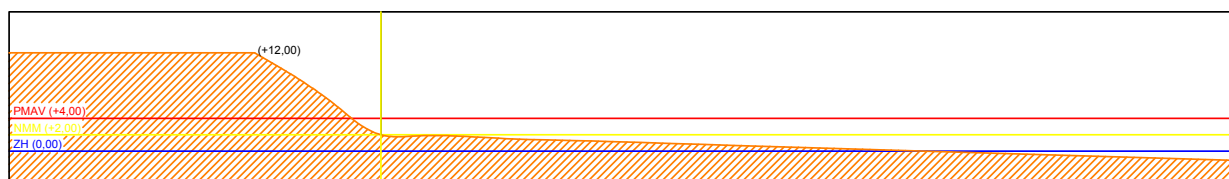
Nas Figuras 70 e 71 apresentam esquemas gráficos dos perfis ensaiados e resultados obtidos em termos de evolução de perfis.

A série A está associada a um perfil transversal não artificializado.

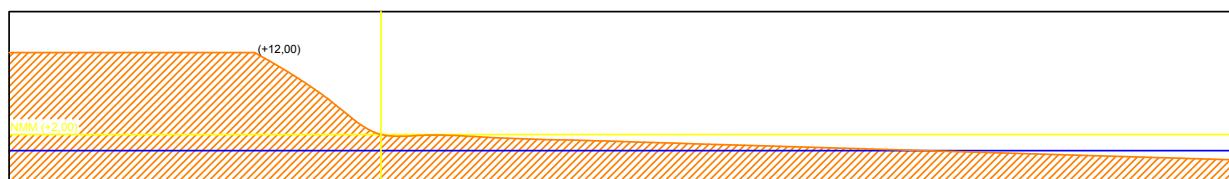
A série B está associada a um perfil transversal que seria inicialmente semelhante ao perfil não artificial anteriormente considerado onde foi inserida uma estrutura aderente de defesa costeira em enrocamento.

As unidades dos valores indicados são à escala real em metros.

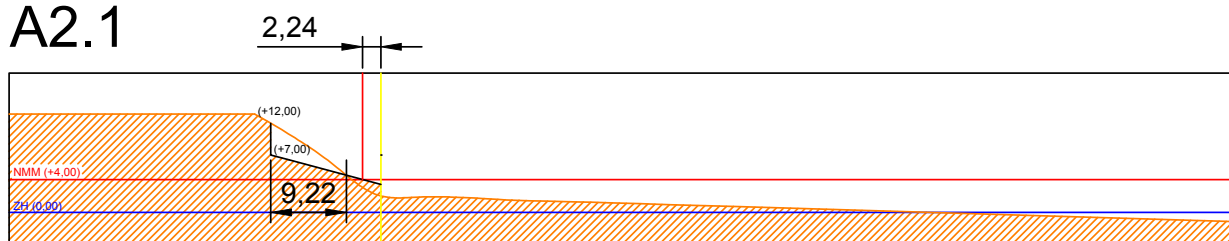
A0



A1



A2.1



A2.3

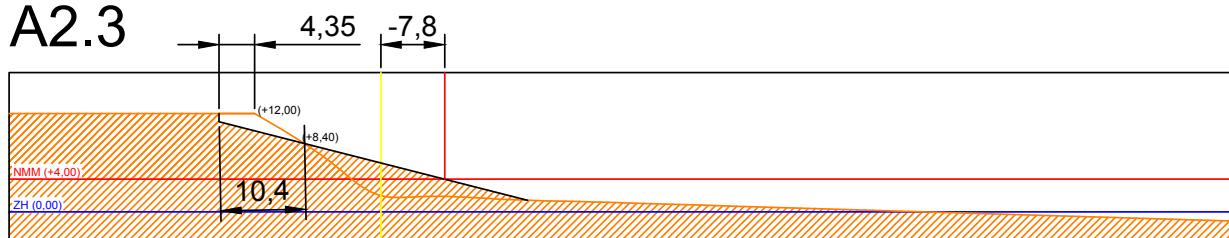
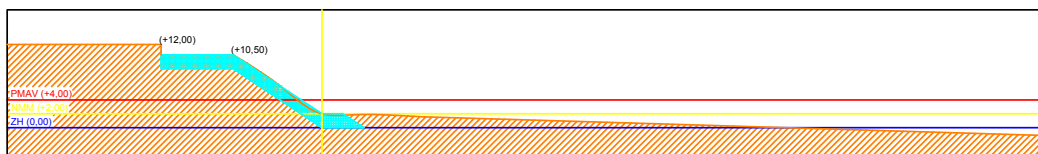


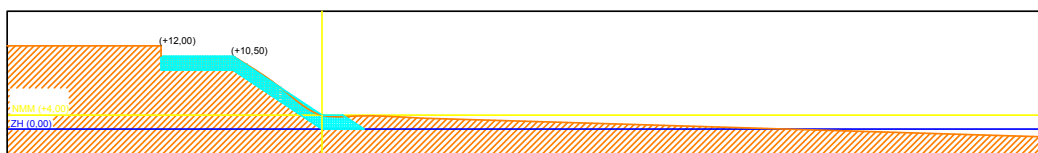
Figura 70- Gráficos dos resultados dos ensaios da série A

Na Figura 70, respeitante à serie de ensaios de um talude natural, é verificado um recuo por erosão, associado à subida de nível da água e um agravamento do mesmo com um regime de agitação de maior energia.

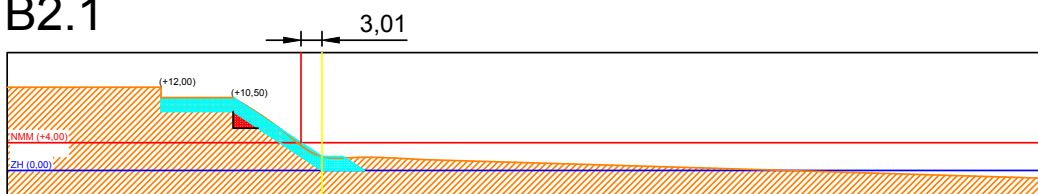
B0



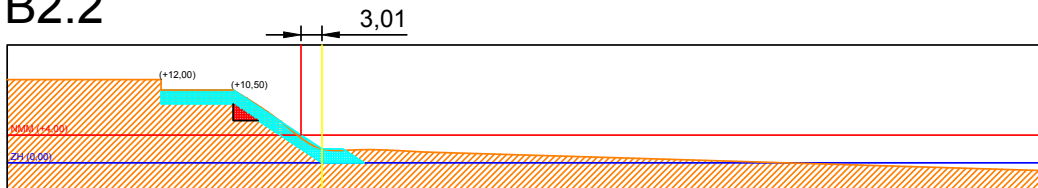
B1



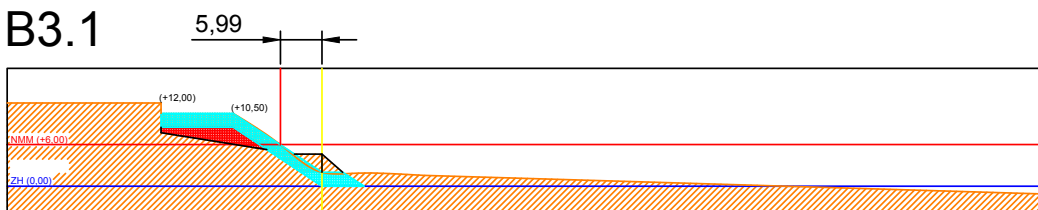
B2.1



B2.2



B3.1



B3.2

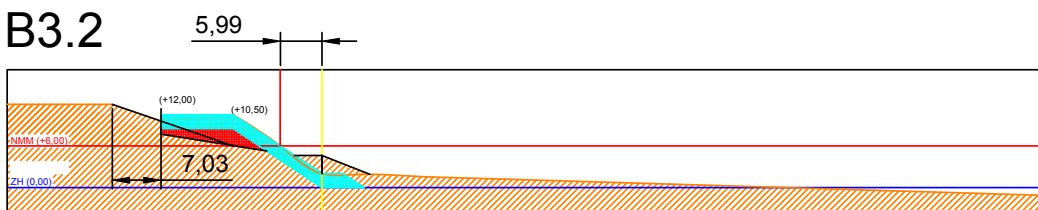


Figura 71-Gráficos dos resultados dos ensaios da série B

Na Figura 71, respeitante à série de ensaios num perfil artificializado, foi verificado um assentamento pontual do talude, provocado por infraescavações. No último ensaio o talude é galgado acentuando o recuo da crista da duna.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. SÍNTESE

O trabalho desenvolvido surge da necessidade de uma abordagem crítica relativa à adequação das metodologias utilizadas na definição das faixas de salvaguarda, relativas ao recuo da linha de costa, face às consequências da subida do nível do mar, inseridas nos novos Programas da Orla Costeira (POC's).

A delimitação dessas faixas tem implicações muito importantes em termos de análise de risco (tipo de intervenções de defesa), planeamento (licenciamento de novas construções, realocações), economia e mercado imobiliário, perceção de residentes e opinião pública.

No centro da questão está a aplicação generalizada da Regra de Bruun (1962) a extensões costeiras com diversas geomorfologias naturais (praias com dunas, praias encaixadas em formações rochosas, costas arenosas e rochosas, costas rochosas) bem como extensões costeiras com artificializações de diversa natureza (estruturas de defesa aderente, esporões, marginais pavimentadas e com muros de suporte, edificações).

Por outro lado, na generalidade das zonas costeiras e especialmente na costa portuguesa, existem fenómenos tridimensionais muito relevantes associáveis à obliquidade da agitação marítima incidente, os quais não são minimamente considerados na formulação de Bruun.

O trabalho começa, após a apresentação da Regra de Bruun em si, por uma compilação de argumentos favoráveis e desfavoráveis à mesma, atendendo aos seus pressupostos e limitações. É então feita uma transposição dessas considerações teóricas a exemplos da realidade da costa portuguesa, procurando perceber, em que medida os pressupostos inerentes à formulação de Bruun (1962), se ajustam ao contexto real.

A segunda fase do trabalho consiste numa série de ensaios laboratoriais a duas dimensões (2D), de carácter exploratório, que procuram evidenciar em que medida a artificialização da costa pode alterar as previsões de recuo de costa por ação da subida do nível médio do mar, face às mesmas ações incidentes adotadas para zonas costeiras naturais.

Para o efeito, o mesmo perfil natural e posteriormente artificializado é experimentalmente submetido à mesma subida de nível da água e ensaiado sobre as mesmas condições de agitação. Uma análise comparativa dos efeitos de erosão e de recuo da crista da seção transversal, procura tirar ilações quanto à validade de se considerar a mesma abordagem de previsão para ambas as situações.

5.2. CONCLUSÕES

Apesar do reduzido número de ensaios realizados e do seu carácter exploratório, com um programa condicionado pela limitada disponibilidade dos equipamentos necessários à experimentação (tanque de ondas e meios de aquisição e tratamento de dados), é possível extrair

algumas conclusões preliminares com alguma relevância em relação ao que este trabalho se propõe.

É importante destacar que o programa experimental não visava a obtenção de quantificações absolutas, mas sim a comparação dos efeitos provocados por situações incidentes de longo termo semelhantes (subida do nível médio do mar) no perfil transversal natural versus artificializado.

Fica claro que logo de um ponto de vista teórico, a formulação de Bruun é entendida como uma abordagem preliminar e não rigorosa do fenómeno de recuo da linha de costa pelo que o estudo deste fenómeno deve ser feito de forma específica para cada caso de aplicação.

Registe-se que no que respeita ao comportamento do perfil natural, a suavização da inclinação do perfil face à subida do nível da água e a verificada elevação dos fundos adjacentes face ao aumento do regime energético da agitação, são observações não concordantes com as apresentadas por Dubois (1975), que apesar de observar fenómenos semelhantes, relaciona a inclinação da face da praia com o regime de agitação e a elevação dos fundos adjacentes com a subida do nível da água.

Talvez a observação mais importante que resultam destas experiências se prenda com o agravamento dos efeitos da erosão e recuo provocados por regimes de agitação mais energéticos. De acordo com o verificado nos ensaios, o agravamento das condições da agitação incidente será de uma relevância superior aos efeitos da subida de nível da água. Esta observação verifica-se para as condições adotadas.

Na comparação dos perfis ensaiados, parece ser evidente que o perfil artificializado, responde à função de proteção costeira, mitigando os efeitos da erosão. Ainda que se verifiquem infraescavações, estas podem ser atribuídas a efeitos de parede no modelo e ao se ter prescindido no modelo do filtro e manta de geossintético e de uma risbrema “pé de talude” que deveriam fazer parte da construção real da estrutura de proteção.

No ensaio B3.2, situação muito extrema, o perfil é galgado, sendo então verificado um recuo acentuado do perfil, por colapso do talude de enrocamento.

O observado indica que a aplicação da formulação de Bruun para perfis arenosos naturais, não se adequa a um perfil artificializado, neste caso uma estrutura aderente em enrocamento.

Os efeitos de escala e de parede estão presentes nos ensaios realizados embora o que se pretendeu foi comparar fenómenos com modelos em que esses efeitos de escala e de parede são semelhantes. A construção de modelos de maior dimensão, não possível com as condições disponíveis, atenuaria esses efeitos de escala.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O desenvolvimento de trabalhos de campo, de longa duração, onde a componente “elevação da subida do nível médio do mar” já se fará sentir, permitirá um melhor entendimento do impacto das especificidades próprias de cada local nos fenómenos de erosão costeira e de recuo da linha da costa.

A realização de um programa de ensaios mais ambicioso exige disponibilidade de equipamentos e tempo para a realização de ensaios e investigação que vão muito para além de alguns meses.

Seria então possível estudar e testar diversos perfis transversais “inspirados” em situações reais, múltiplas situações de posterior artificialização desses perfis, bem como um maior número de combinações de níveis de água e de estados de agitação incidentes.

Não foram abordados os efeitos tridimensionais, que são muito importantes e que não fazem parte da génese da formulação de Bruun. As correntes de deriva litoral transportam os sedimentos no sentido longitudinal da praia (para sotamar) e se não existirem condições de reposição de sedimentos a partir de barlamar as erosões e o recuo da linha de costa são muito mais acentuados.

Num ensaio em canal, onde as condições foram criadas para um estudo bidimensional, estes fenómenos não são simulados pelo que um programa experimental deveria ser realizado em tanque de ondas com incidência oblíqua da agitação. Por outro lado, as estruturas de artificialização tão comuns como os esporões e os quebramares portuários interferem no balaço longitudinal de sedimentos, tornando essencial a consideração de fenómenos tridimensionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum, vol. 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 82 pp.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbors Division 88, 117 – 130.
- Bruun, P., 1988. The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two- and three-dimensional usages. Journal of Coastal Research 4, 627 – 648
- Coelho, Carlos (2005). *Riscos de exposição em frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira*, PhD Thesis: Universidade Aveiro, Portugal
- Dean, R.G., 1990. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. Journal of Coastal Research 7, 53 – 84.
- Dean, R.G., Maurmeyer, E.M., 1983. Models for beach profile responses. In: Komar, P.D. (Ed.), Handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 151 – 166.
- Dubois, R.N., 1975. Support and refinement of the Bruun Rule on beach erosion. Journal of Geology 83, 651 – 657.
- Dubois, R.N., 1976. Nearshore evidence in support of the Bruun Rule on shore erosion. Journal of Geology 84, 485 – 491.
- Hands, E.B., 1979. Changes in rates of shore retreat, Lake Michigan, 1967–76. U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center Technical Paper No. 79-4. December 1979, Vicksburg, Mississippi, 71 pp.
- Hands, E.B., 1980. Prediction of shore retreat and nearshore profile adjustments to rising water levels on the Great Lakes. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, Technical Memorandum No. 80-7, 119 pp.
- Hands, E.B., 1983. The Great Lakes as a Test Model for Profile Responses to Sea Level Changes. In: Komar, P.D. (Ed.), Handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 176 – 189.
- Pilkey, O.H., Davis, T.W., 1987. An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: Nummedal, D., Pilkey, O.H., Howard, J.D. (Eds.), Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, pp. 59 – 68.
- Pilkey, O.H., Cooper, J.A.G., 2004. Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. Global and Planetary Change 43 (2004) 157 – 171
- Rosen, P.S., 1978. A regional test of the Bruun Rule on shoreline erosion. Marine Geology 26, M7 –M16.
- Ranasinghe R, Watson P, Lord D, Hanslow D, Cowell P (2007) Sea level rise, Coastal recession, and the Bruun Rule. Proceedings of Coasts and Ports '07, Melbourne, VIC, Australia.
- Schwartz, M., 1965. Laboratory study of sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal of Geology 73, 528 – 534.

Schwartz, M., 1967. The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Geology* 75, 76 – 92.

SCOR, Working Group 89, 1991. The response of beaches to sealevel changes: a review of predictive models. *Journal of Coastal Research* 7, 895 – 921.