

DESENVOLVIMENTO DE UM BLOCO INOVADOR PARA PROTEÇÃO COSTEIRA

PEDRO MIGUEL MOTA DA CRUZ GOMES

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

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

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 - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

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.

À minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Na conclusão de mais uma etapa do meu percurso académico, é pertinente deixar um agradecimento às pessoas que me acompanharam e tornaram possível a realização desta dissertação, mas também ao longo do curso e da vida.

- Ao Professor Francisco Taveira Pinto e ao Professor Paulo Rosa Santos, respetivamente, orientador e coorientador desta dissertação, pela disponibilidade, acompanhamento e pelo contributo com os seus conhecimentos e conselhos para a resolução das várias questões que surgiram ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

- Ao senhor Miguel Guerra que através do seu empenho e trabalho tornou possível não só o desenvolvimento do bloco, mas também a realização dos trabalhos experimental em tempo útil, tendo sempre uma solução para os imprevistos que foram surgindo ao longo do trabalho de laboratório.

- À dona Esmeralda Miguel e à dona Paula Pinto do Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, por todo o apoio prestado ao longo da realização deste trabalho.

- Aos meus Pais, e restante família, pelo apoio, dedicação e motivação que me transmitiram ao longo da vida, mas também pela confiança que depositaram em mim e que permitiu que este momento fosse possível.

- Ao meu grupo de amigos, que carinhosamente gosto de chamar “Amigos do Secundário” pela paciência e compreensão, pelas várias ausências ao longo destes cinco anos e por estarem presentes sempre que preciso.

- Por último, contudo de igual importância, agradeço a todos os amigos que fiz ao longo destes cinco anos, pela ajuda, companheirismo e vivências partilhadas ao longo do curso, tendo a consciência que pelo menos com alguns apenas estamos a viver o início de vários momentos que se repetirão ao longo da vida.

A todos o meu muito obrigado.

RESUMO

O aumento da frequência e intensidade das tempestades a que se tem assistido nas últimas dezenas de anos, são resultado das alterações climáticas que se começaram a verificar no século passado e trazem consigo novos desafios à engenharia costeira. Os estragos provocados pelas tempestades ocorridas nos últimos anos em diversas regiões do mundo são demonstrativos do poder destrutivo que estas podem ter nas áreas localizadas próximo da costa. Estes fatores aliados a uma crescente preocupação e consciencialização da opinião pública acerca destes problemas, e suas pretensões do ponto de vista da salvaguarda da paisagem natural das zonas costeiras, gerou a necessidade de se procurar novas soluções que fossem uma alternativa viável às medidas já existentes.

Na presente dissertação apresenta-se a proposta de desenvolvimento de um bloco inovador que constitua uma solução alternativa menos dispendiosa do que as soluções tradicionais de proteção costeira, mas que ao mesmo tempo seja capaz de responder às novas exigências ambientais e sociais.

Numa primeira fase efetuou-se o desenvolvimento de uma secção transversal que servisse de ponto de partida para a introdução de elementos característicos adicionais tendo em vista aumentar a eficiência na dissipação da energia das ondas tais como a rugosidade, a porosidade e a permeabilidade.

Para compreender o comportamento hidráulico e estrutural da solução proposta, este trabalho inclui também uma componente laboratorial, em modelo físico, onde também se pretende averiguar a eficiência do bloco quando exposto a diferentes condições de agitação marítimas.

Foram testados dois níveis de maré correspondentes ao nível de baixa-mar e de preia-mar, que apresentam diferentes graus de exigência em relação ao comportamento do bloco. O modelo físico foi construído à escala geométrica de 1:15, que foi determinada de acordo com as limitações físicas do tanque e do gerador de ondas em relação às condições que se pretendia estudar. O plano de ensaios incluiu testes com ondas irregulares com alturas significativas variáveis (0.90 m, 1.20 m e 1.50 m, para ambos os níveis e 1.95 m, para o nível de preia-mar) a que correspondiam diferentes períodos de pico (9 s, 11 s e 13s, para ambos os níveis e 16 s, para o nível de preia-mar). A eficiência do bloco desenvolvido foi estudada através da análise da reflexão e das alterações do perfil transversal da praia.

Os resultados dos ensaios mostraram que os modelos desenvolvidos apresentam desempenhos diferentes, embora próximos. De referir que algumas soluções agravaram os problemas de erosão enquanto outras se mostraram bastante eficientes na mitigação destes problemas conseguindo até reverter os seus efeitos.

Por fim, tendo por base o trabalho realizado, propõem-se algumas alterações que se pensa poderem melhorar o comportamento da estrutura constituindo os desenvolvimentos futuros da dissertação.

PALAVRAS-CHAVE: erosão costeira, proteção costeira, modelação física, estruturas modulares, recifes artificiais.

ABSTRACT

The increased frequency and intensity of storms observed in the last few decades are the result of climate change effects which started to become noticeable in the last century bringing new challenges to coastal engineering. The magnitude of the damages caused by the storms that have occurred in recent years in various regions of the world, are statements of the destructive power that they can have in the areas located near the coast. These factors combined with a growing concern and awareness of the public about these issues, and its pretensions from the point of view of safeguarding the natural landscape of the coastal zones, generated the need to seek new and innovative solutions that could be a viable alternative to existing measures.

This dissertation presents the proposal for the development of an innovative block that constitutes an alternative solution potentially less expensive than traditional coastal protection solutions, but at the same time able to respond to new environmental and social requirements.

Initially, a new cross section was developed to serve as a starting point for the implementation new elements and features to enhance such wave energy dissipation as the roughness, porosity and permeability.

To understand the hydraulic and structural behaviour of the proposed solution, the dissertation also includes a physical modelling component planned in order to determine the efficiency of the block when exposed to different environmental conditions.

Two tidal levels were tested, one corresponding to the low water level and the other to the high water level, which introduce different requirements in relation to the behaviour of the block. The physical model was built to the geometric scale of 1:15, according to the physical limitations of the tank and of the wave generator, in relation to conditions that were intended to study. The test plan included irregular waves with four significant incident wave heights (0.90 m, 1.20 m and 1.50 m, for both levels and 1.95 m, to the high tide level) which were associated with different peak wave periods (9s, 11s and 13s, to both levels and 16 s, to the high tide level). The block efficiency was studied by analysing the wave reflection and the modifications to the beach profile.

The results of the tests showed that the models developed present different performances, some of them make erosion problems worse while others proved to be quite efficient in mitigating those problems and even in reverse its effects.

At the end, based on the work carried out, some modifications are proposed to improve the behaviour of the structure, which should be tested in future optimization studies.

KEY WORDS: costal erosion, costal protection, physical modelling, modular structures, artificial reefs

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 EROSÃO COSTEIRA: CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. CARACTERIZAÇÃO E EFEITOS DA EROSÃO COSTEIRA.....	3
2.2.1. EFEITOS LONGITUDINAIS	4
2.2.2. EFEITOS TRANSVERSAIS	6
2.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO.....	8
2.3.1. SURGEBREAKER	9
2.3.2. BEACHSAVER REEF	11
2.3.3. WAVEBLOCK.....	13
2.3.4. DRIM-DISTORTED RIPPLE MAT.....	14
2.3.5. DOUBLE-T SILL.....	15
2.3.6. P.E.P. REEFS – PREFABRICATED EROSION PREVENTION REEF	17
2.4. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CARATERÍSTICAS DOS BLOCOS FACE AO NOVO BLOCO.....	18
3 DESENVOLVIMENTO DE UM BLOCO INOVADOR	21
3.1. INTRODUÇÃO.....	21
3.2. CARATERÍSTICAS DO SWED-BLOCK.....	22
3.2.1. MODELO LISO.....	27
3.2.2. MODELO RUGOSO	28
3.2.3. MODELO POROSO.....	30
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL 2D E ANÁLISE DE RESULTADOS	35

4.1. ENQUADRAMENTO	35
4.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	36
4.2.1. DESCRIÇÃO GERAL DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	36
4.2.2. INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	40
4.3. PLANO DE ENSAIOS	43
4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4.4.1. ANÁLISE DA REFLEXÃO	46
4.4.2. RESULTADOS DA ANÁLISE DE REFLEXÃO.....	47
4.4.2.1. Variação do coeficiente de reflexão com a alteração das condições de agitação.	47
4.4.2.2. Variação do coeficiente de reflexão para os diferentes modelos do bloco.....	54
4.4.3. ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES DO PERFIL TRANSVERSAL DA PRAIA.....	61
4.4.3.1. Cenário de Praia Desprotegida.....	61
4.4.3.2. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Liso.....	64
4.4.3.3. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Rugoso.....	69
4.4.3.4. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Poroso.....	73
4.4.3.5. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Liso com 0.20 m.....	78
4.4.3.6. Síntese do comportamento das diferentes configurações do bloco	82
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	85
5.1. CONCLUSÕES.....	85
5.2. DESENVOLVIMENTO FUTUROS.....	86
Referências Bibliográficas	87
Anexos	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Erosão dunar provocada pela ocorrência de uma tempestade (Pilarczyk, 2012, adaptado de Van der Meer, 1988).	4
Fig. 2.2 - Erosão a sotamar dos esporões de Esmoriz e Cortegaça, Ovar (Google Maps, 2017).	5
Fig. 2.3 - Evolução do processo erosivo num campo de esporões (adaptado USGS, 2004)....	6
Fig. 2.4 - Variação sazonal do perfil das praias por ocorrência de erosão transversal (adaptado de Seymour, 2005).....	7
Fig. 2.5 - Evolução das alterações da costa, por erosão transversal em Happisburgh, Norwich, na costa oeste de Inglaterra em 1996, 2006 e 2012 (Mike Page, 2012).	8
Fig. 2.6 - Obras de defesa aderente em betão (Fitzpatrick, 2013) e em madeira (Happisburgh Project).	9
Fig. 2.7 - Surgebreaker (Low Cost Shore Protection: US Army, 2004).	10
Fig. 2.8 - Aspeto geral do bloco Surgebreaker (adaptado de Pilarczyk e Zeidler, 1996).	10
Fig. 2.9 - Beachsaver Reef e pormenor do mecanismo de ligação entre módulos (US Army, 2002).	11
Fig. 2.10 - “Backwash flame” em funcionamento (wawtech.net).....	12
Fig. 2.11 - Ilustração esquemática do Waveblock (Pilarczyk e Zeidler, 1996).....	14
Fig. 2.12 - Esquema de funcionamento do sistema DRIM (adaptado de Pilarczyk, 2010).....	15
Fig. 2.13 - Vista geral e mecanismo de ligação entre módulos do Double-T Sill (US Army, 2002).	16
Fig. 2.14 - Esquema geral do P.E.P. Reefs (Stauble, 2002).....	17
Fig. 2.15 - Esquema de implantação do P.E.P Reefs (adaptado de Coastal Engineering, 1996).	18
Fig. 2.16 - Esquema geral da implantação dos blocos apresentados (exceto o Surgebreaker).	19
Fig. 3.1 - Modos de Rotura Global (adaptado de Kamphuis, 2000).....	22
Fig. 3.2 - Secção transversal inicial do protótipo do SWED-Block.....	23
Fig. 3.3 - Esquema da aplicação do método de Goda a um quebramar vertical (Kamphuis, 2002).	24
Fig. 3.4 - Ilustração da interligação entre blocos, vista em planta.	25
Fig. 3.5 - Pormenor da interligação entre blocos no molde de construção do modelo liso, vista de dentro.	25
Fig. 3.6 - Fundação do SWED-Block e respetivas dimensões no protótipo.	26
Fig. 3.7 - Molde em madeira para o modelo rugoso, onde são visíveis os elementos que conferem uma fundação irregular aos blocos.	26
Fig. 3.8 - Ilustração do protótipo do modelo liso do SWED-Block.	27
Fig. 3.9 - SWED-Block, modelo liso, vista de barlar e lateral esquerda.....	28

Fig. 3.10 - SWED-Block, modelo liso, vista de sotamar e lateral direita.	28
Fig. 3.11 - Ilustração do protótipo do modelo rugoso do SWED-Block.	29
Fig. 3.12 - SWED-Block, modelo rugoso, vista de barlamar e lateral esquerda.	30
Fig. 3.13 - SWED-Block, modelo rugoso, vista de sotamar e lateral direita.	30
Fig. 3.14 - Ilustração do protótipo do modelo poroso do SWED-Block.	31
Fig. 3.15 - Vista em planta do paramento de barlamar do modelo poroso do SWED-Block (medidas em valores de protótipo).....	32
Fig. 3.16 - Área ativa do paramento de barlamar do modelo poroso do SWED-Block (dimensões em protótipo).....	33
Fig. 3.17 - Representação 3D do modelo poroso do SWED-Block, destacando a área ativa do paramento de barlamar (zona vermelha).	33
Fig. 3.18 - SWED-Block, modelo poroso, vista de barlamar e lateral esquerda.	34
Fig. 3.19 - SWED-Block, modelo poroso, vista de sotamar e lateral direita.	34
Fig. 3.20 - SWED-Block, modelo poroso, vista de lado direito.....	34
Fig. 4.1 - Sequência construtiva dos modelos do SWED-Block.	36
Fig. 4.2 - Visão geral do tanque de ondas, pás geradoras, praia de enrocamento e sala de controle.....	37
Fig. 4.3 - Esquema do tanque de ondas da FEUP, com o canal de 0.80 m de largura, onde se realizaram os ensaios.	37
Fig. 4.4 - Aparelho gerador do movimento efetuado pelas pás.	38
Fig. 4.5 - Pormenor das pás, e dos elementos metálicos verticais parte integrante do mecanismo ativo de absorção da reflexão.....	38
Fig. 4.6 - Sondas instaladas no canal de ensaios, sendo visível ao fundo o batedor utilizado.	39
Fig. 4.7 - Instrumento de aquisição dos dados do perfilador 2D.....	39
Fig. 4.8 - Carril por onde se desloca o elemento de suporte do perfilador.	40
Fig. 4.9 - Elemento de suporte (azul) e haste vertical.....	40
Fig. 4.10 - Sequência construtiva da praia de areia utilizada nos ensaios do SWED-Block.	41
Fig. 4.11 - Troço do canal com a disposição das sondas entre o batedor (azul) e o início da praia.....	42
Fig. 4.12 - Ilustração esquemática da instalação do perfilador 2D no canal de ensaios.	42
Fig. 4.13 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda para a praia desprotegida (valores em modelo).	47
Fig. 4.14 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para a praia desprotegida.....	48
Fig. 4.15 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda para a praia protegida com o modelo liso do SWED-Block (valores em modelo).	49
Fig. 4.16 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo liso.	49

Fig. 4.17 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo rugoso do SWED-Block (valores em modelo).	50
Fig. 4.18 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo rugoso do SWED-Block.....	51
Fig. 4.19 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo poroso do SWED-Block (valores em modelo).	52
Fig. 4.20 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo poroso.....	53
Fig. 4.21 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo liso de 0.20 m do SWED-Block (valores em modelo).....	53
Fig. 4.22 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo liso de 0.20 m.	54
Fig. 4.23 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de BM (valores em modelo).	54
Fig. 4.24 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de BM (valores em modelo).	55
Fig. 4.25 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o nível de maré de BM.	56
Fig. 4.26 - Variação do C_R , com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de PM (valores em modelo).	56
Fig. 4.27 - Variação do C_R , com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de PM (valores em modelo).	57
Fig. 4.28 - Variação do C_R , em função do parâmetro adimensional, para o nível de maré de PM.	57
Fig. 4.29 - Perfil transversal da praia desprotegia, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.....	61
Fig. 4.30 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.	62
Fig. 4.31 - Perfil transversal da praia desprotegia antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.....	63
Fig. 4.32 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.	63
Fig. 4.33 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.	64
Fig. 4.34 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.	64
Fig. 4.35 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.....	65
Fig. 4.36 - Bloco na posição final, o desenho a preto no vidro representa a posição inicial.	65
Fig. 4.37 - Vista de cima do modelo liso.....	66

Fig. 4.38 - Vista de sotamar do modelo liso.	66
Fig. 4.39 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.	67
Fig. 4.40 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.	67
Fig. 4.41 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.	68
Fig. 4.42 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).	68
Fig. 4.43 - Posição final dos blocos do modelo liso, vista de cima.	68
Fig. 4.44 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.	69
Fig. 4.45 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo rugoso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.	69
Fig. 4.46 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.	70
Fig. 4.47 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).	70
Fig. 4.48 - Posição final dos blocos do modelo rugoso, vista de cima.	71
Fig. 4.49 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.	71
Fig. 4.50 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo rugoso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.	72
Fig. 4.51 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.	72
Fig. 4.52 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).	72
Fig. 4.53 - Posição final dos blocos do modelo rugoso, vista de cima.	73
Fig. 4.54 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.	74
Fig. 4.55 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo poroso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.	74
Fig. 4.56 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.	75
Fig. 4.57 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).	75
Fig. 4.58 - Posição final dos blocos do modelo poroso, vista de cima.	75
Fig. 4.59 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.	76
Fig. 4.60 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo poroso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.	76
Fig. 4.61 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.	77
Fig. 4.62 - Bloco na posição final, (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).	77
Fig. 4.63 - Posição final dos blocos do modelo poroso, vista de cima.	78

Fig. 4.64 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.	78
Fig. 4.65 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso (0.20 m), antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.....	79
Fig. 4.66 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.....	80
Fig. 4.67 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).	80
Fig. 4.68 - Posição final dos blocos do modelo liso com 0.20 m, vista de cima.	80
Fig. 4.69 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.	81
Fig. 4.70 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso (0.20 m), antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.....	81
Fig. 4.71 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).	82
Fig. 4.72 - Posição final dos blocos do modelo liso com 0.20 m, vista de cima.	82
Fig. 4.73 - Comparação entre o perfil inicial da praia e todos os perfis finais obtidos, para o nível de PM.....	83
Fig. 4.74 - Comparação entre o perfil inicial da praia e todos os perfis finais obtidos, para o nível de PM.....	83

ÍNDICE DE TABELAS

Quadro 2.1 - Síntese das características dos blocos usados como base no desenvolvimento do novo bloco.....	19
Quadro 4.1 - Posicionamento e espaçamento das sondas de níveis hidrodinâmicos.	41
Quadro 4.2 - Gama de frequências abrangidas pelas sondas para os dois níveis de maré.....	42
Quadro 4.3 - Ondas irregulares consideradas no estudo (espectro Jonswap).	43
Quadro 4.4 - Número de ondas esperado nos ensaios com agitação irregular.	45
Quadro 4.5 - Coeficientes de reflexão registados para o nível de Baixa-Mar.	58
Quadro 4.6 - Coeficientes de reflexão registados para o nível de Preia-Mar.	58
Quadro 4.7 - Alturas de onda significativas geradas nos ensaios.	60

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

POR ORDEM ALFABÉTICA

AEA – Agência Europeia do Ambiente

BM – Nível de Maré de Baixa-Mar [m]

C_R – Coeficiente de Reflexão

CFD – Computational Fluid Dynamics

d – Profundidade submersa [m]

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DWA – Dynamic Wave Absorption

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

g – Aceleração gravítica [m/s^2]

H – Altura de Onda [m]

H_{si} – Altura de Onda Significativa Incidente [m]

H_{sr} – Altura de Onda Significativa Refletida [m]

L – Comprimento de Onda [m]

MDF – Medium-Density Fiberboard

MHW – Mean High Water level [m]

MLW – Mean Low Water level [m]

MSL – Mean Sea Level [m]

NAVD88 – North America Vertical Datum of 1988

NGVD 1929 – National Geodetic Vertical Datum of 1929

PM – Nível de Maré de Preia-Mar [m]

RANS – Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

SWED-Block – Submerged Wave Energy Dissipation Block

T_p – Período de Pico [s]

USGS – United States Geological Survey

US Army – US Army Corps of Engineers

ZH – Zero Hidrográfico [m]

λ_L – Escala geométrica

λ_T – Escala dos tempos

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A necessidade de adotar medidas de proteção costeira continua a ser bastante importante em muitas regiões do mundo, entre as quais Portugal. As alterações climáticas que se observa ocorrerem pelo menos desde o início da revolução industrial, no final no século XVIII em Inglaterra, têm diversos impactos no meio ambiente, como: a subida temperatura média mundial em 0.8°C nos últimos 150 anos, a mudança nos padrões de pluviosidade, o derretimento dos glaciares e da neve e o aumento do nível médio do mar (Agência Europeia do Ambiente, 2017).

A ocorrência de situações meteorológicas extremas, incluindo ondas de calor, secas e inundações são alguns dos fenómenos que se tem observado nas últimas décadas (AEA, 2017). Apesar da sua origem não poder ser diretamente imputada às alterações climáticas, uma vez não existe um consenso global sobre esta matéria, existem, contudo, evidências da possível ocorrência de um aumento da frequência e da intensidade das tempestades no futuro.

As consequências destes fatores, principalmente o aumento do nível médio do mar e o aumento da frequência e da intensidade das tempestades terá, naturalmente, diversas consequências nos territórios, sendo as regiões costeiras algumas das zonas mais afetadas pelos seus efeitos. Os estragos provocados pelas tempestades ocorridas nos últimos anos em Portugal e na Europa são demonstrativos do poder destrutivo que estas podem ter nas áreas localizadas próximo da costa.

Existem diversas estruturas de proteção costeira, sendo algumas já utilizadas ao longo dos séculos, como por exemplo, os quebra-mares ou os esporões. Contudo, estas soluções podem ter impactos negativos nas regiões vizinhas, sendo por vezes necessário adotar medidas de proteção complementares. Também a crescente preocupação e consciencialização da opinião pública acerca destes problemas, e as suas pretensões do ponto de vista da salvaguarda da paisagem natural das zonas costeiras, gerou a necessidade de se procurarem soluções que fossem uma alternativa viável às medidas já existentes.

Soluções submersas, como os quebra-mares submersos são uma das hipóteses, cuja a execução, no entanto, carece de meios e recursos mais dispendiosos, fazendo sentido o desenvolvimento de novas soluções cuja implementação seja mais fácil, rápida e económica.

As estruturas como o bloco inovador de proteção costeira desenvolvido no âmbito desta dissertação, constituem uma alternativa previsivelmente menos dispendiosa do que as soluções de proteção costeira tradicionais. Pretende-se, também, que constituam uma solução inovadora capaz de responder às novas exigências ambientais e sociais, mas que não descuidem o seu objetivo principal, que continua a ser proteger as regiões costeiras da ação do mar.

A solução desenvolvida é constituída por módulos pré-fabricados em betão armado, com dimensões e peso que facilitem o transporte e a colocação no local pretendido. O número e a dimensão dos módulos do bloco podem ser definidos tendo em conta as necessidades e especificidades de cada local.

Neste trabalho pretende-se não só desenvolver uma solução alternativa às soluções existentes, mas também avaliar o seu funcionamento hidráulico e a estabilidade, quando exposta a diferentes condições de agitação marítima, que podem ser favoráveis ou desfavoráveis a um comportamento positivo da estrutura.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Em termos de conteúdo, a presente dissertação está organizada da seguinte forma:

- No capítulo 2, é apresentada uma caracterização do problema da erosão costeira, sendo descritas as principais causas e efeitos por ela provocados nas zonas costeiras. São ainda abordadas as diferentes medidas existentes para a mitigação deste problema, sendo apresentados alguns exemplos de blocos semelhantes ao que se pretende desenvolver neste trabalho.
- Os pressupostos que estiveram na base do desenvolvimento do bloco inovador, são descritos no capítulo 3, onde são também apresentadas as características que distinguem os vários modelos desenvolvidos, bem como os elementos que se considera terem um impacto positivo no comportamento e na eficiência da estrutura.
- A descrição do procedimento experimental e dos equipamentos utilizados é feita no capítulo 4. Este capítulo constitui a parte mais relevante deste trabalho, uma vez que é aqui que se apresentam os resultados experimentais obtidos para o bloco desenvolvido, nos testes realizados em modelo físico reduzido.
- Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões do trabalho laboratorial e as propostas de desenvolvimentos futuros, com o objetivo de melhorar os aspetos em que o bloco inovador pode ser ainda desenvolvido.

2

EROSÃO COSTEIRA: CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

Sendo o tema desta dissertação o desenvolvimento de um bloco inovador de proteção costeira, que mitigue os efeitos da erosão na costa, é importante fazer uma breve caracterização desse fenómeno. Para tal, serão descritas no presente capítulo as principais causas e processos que estão na origem da ocorrência de problemas de erosão costeira.

A ocorrência de erosão costeira é originada por diferentes causas, como tal, também os efeitos por esta provocados nos locais expostos à agitação marítima podem ser distintos, sendo aqui descritos os dois principais tipos de efeitos da erosão, os efeitos longitudinais e os efeitos transversais, na secção 2.2.1 e na secção 2.2.2, respetivamente.

As respostas dadas aos diferentes problemas provocados pela erosão costeira, são também distintas, existindo várias medidas de mitigação, que são utilizadas em função das necessidades e características de cada local. Na secção 2.3, são referidas várias soluções para a resolução dos problemas de erosão, sendo apresentados também alguns blocos de proteção costeira semelhantes ao que se pretende desenvolver neste trabalho.

2.2. CARACTERIZAÇÃO E EFEITOS DA EROSÃO COSTEIRA

A ocorrência de erosão é um dos problemas mais frequentes em algumas zonas costeiras, nomeadamente das dunas e das praias. Para compreender a erosão costeira e adotar medidas de mitigação adequadas, é necessário perceber os processos hidráulicos e morfológicos envolvidos. Na sua origem, estes são influenciados essencialmente por fenómenos como o vento, as ondas, as marés e o transporte sedimentar, sendo este último desfavorável quando existe um balanço sedimentar negativo.

O vento, fenómeno natural que consiste na movimentação de ar em grande quantidade, é responsável pela geração das ondas e flutuações locais do nível médio da água do mar. As situações de vento forte, que originam tempestades e ondas com alturas elevadas, são um fator determinante para a estabilidade das estruturas de proteção costeira e para a ocorrência de erosão. A ação eólica é também significativa nas zonas emersas das praias e nos sistemas dunares (Veloso Gomes, 1993). As marés originam a subida e a descida periódica do nível de água do mar e as correntes de marés, sendo estas últimas significativas nos estuários, nas embocaduras dos rios e nas áreas marítimas que as envolvem. Nesses locais ocorre ainda a interação da agitação marítima e das correntes de origem fluvial com as correntes de marés.

A erosão costeira pode ocorrer devido a dois processos fundamentais distintos (Pilarczyk, 2012): erosão associada a tempestades severas, erosão estrutural ou uma combinação entre os dois processos. A erosão durante a ocorrência de tempestades pode ser considerada como um fenômeno temporário de redistribuição de sedimentos, no qual a areia das dunas e das praias é transportada para o leito marinho onde se deposita (Fig. 2.1). Em condições normais, após a tempestade, essa areia regressa, parcialmente, ao seu local de origem. O processo de erosão estrutural é um pouco diferente do processo anteriormente referido, pois na maior parte dos casos, esta deve-se a gradientes morfológicos ao longo da costa, principalmente gradientes nas correntes longitudinais. O volume de areia que constitui o perfil transversal das praias, vai reduzido gradualmente ao longo do tempo e sem medidas de mitigação adicionais, este volume pode ser perdido de forma permanente.

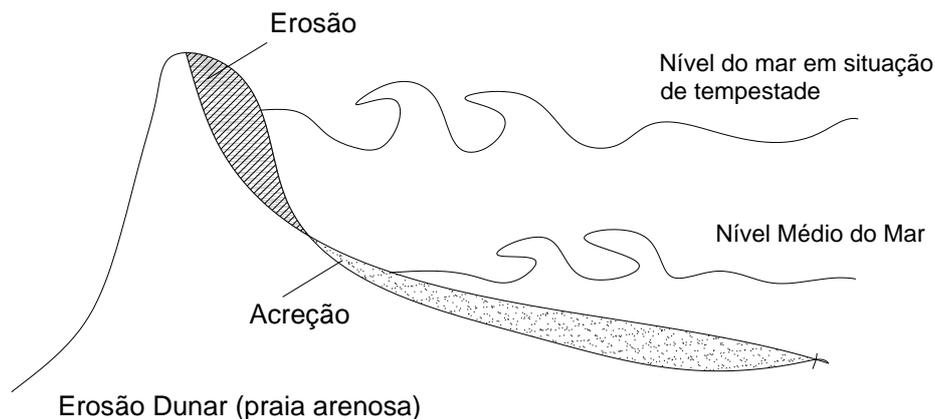


Fig. 2.1 - Erosão dunar provocada pela ocorrência de uma tempestade (Pilarczyk, 2012, adaptado de Van der Meer, 1988).

Diversos fatores evidenciam a ocorrência de erosão costeira (Velooso Gomes, 1993): o recuo da linha de costa, a diminuição da largura das praias e a alteração do perfil transversal das mesmas, são indicadores que provam a ocorrência de uma situação generalizada de processos erosivos que se verificam a nível nacional e mundial.

São várias as causas apresentadas para justificar a ocorrência de processos erosivos, desde logo as alterações climáticas tendo como consequência o aumento do nível médio da água do mar e da frequência e intensidade de tempestades (AEA, 2017), mas também fatores que resultam da ação humana na dinâmica natural das praias, como a extração de areia para atividades ligadas à construção civil, modificações na cobertura vegetal das dunas, ocupação e destruição das mesmas para apoio a atividades recreativas, enfraquecimento das fontes aluvionares devido à regularização dos rios, canalização dos principais rios e até mesmo através da construção de obras de defesa costeira que ao protegerem uma determinada área, têm uma influência negativa em áreas adjacentes.

2.2.1. EFEITOS LONGITUDINAIS

Os efeitos longitudinais da erosão na costa são provocados pela movimentação da areia de barlar para sotamar ao longo da costa. No caso da costa oeste de Portugal continental, esta movimentação processa-se maioritariamente de norte para sul.

A construção de obras de proteção costeira como esporões ou quebramares, contribuiu em certa medida para o agravamento da erosão costeira em algumas zonas, porque constituem uma barreira física que interrompe, em parte, a natural dinâmica da deriva litoral, que deveria alimentar as praias (Fig. 2.2).



Fig. 2.2 - Erosão a sotamar dos esporões de Esmoriz e Cortegaça, Ovar (Google Maps, 2017).

Os esporões são estruturas transversais de proteção costeira, que se destinam a reter sedimentos de forma minimizar os efeitos da ação do mar em determinado local, normalmente construídos para defender povoações que se localizam perto da praia e que se encontram em situação de poderem ser atingidas pela ação marítima. Já os quebra-mares são estruturas de proteção que visam não só apoiar ou proteger a entrada de zonas portuárias e o acesso às embocaduras dos rios, mas também criar condições de abrigo dentro dos portos.

Como já se referiu, estas estruturas interrompem a dinâmica da deriva litoral e o transporte de sedimentos. Com efeito, os sedimentos ao encontrarem uma dessas estruturas, ficam retidos a barlar da estrutura, contribuindo para o alargamento da praia aí existente. Situação inversa acontece a sotamar, uma vez os sedimentos ficam impedidos de avançar para sotamar continuando as ondas a incidir sobre aquela zona, agravando os problemas de erosão. Os sedimentos são arrastados para maiores profundidades e não são repostos. Esta situação verifica-se em vários locais da costa ocidental portuguesa, e está ilustrada na Fig. 2.2 e na Fig. 2.3.

Embora a ocorrência de erosão a sotamar seja uma situação não desejável, é um mal menor quando comparado com o que sucederia se não se construíssem estas estruturas. No caso dos esporões, a acumulação de areia a barlar não ocorreria e a proteção das povoações costeiras não se realizaria, pois, o mar incidiria diretamente sobre estas. Os esporões são, portanto, uma medida que tem efeitos positivos e negativos do ponto de vista da erosão costeira e a sua utilização terá de ser conciliada com outras de mitigação, que mais à frente se irão abordar.

O enfraquecimento das fontes aluvionares é uma das principais razões para os efeitos longitudinais da erosão na costa. Resulta, sobretudo, de ações antropogénicas que tiveram lugar maioritariamente ao longo do século XX e no início do século XXI, como a construção de aproveitamentos hidroelétricos, a proteção das margens dos rios e a sua urbanização e as extrações de areia para fins comerciais. Estas ações contribuíram para a diminuição dos volumes aluvionares transportados pelos rios até ao mar, e depois distribuídos pelas praias por ação da deriva litoral.

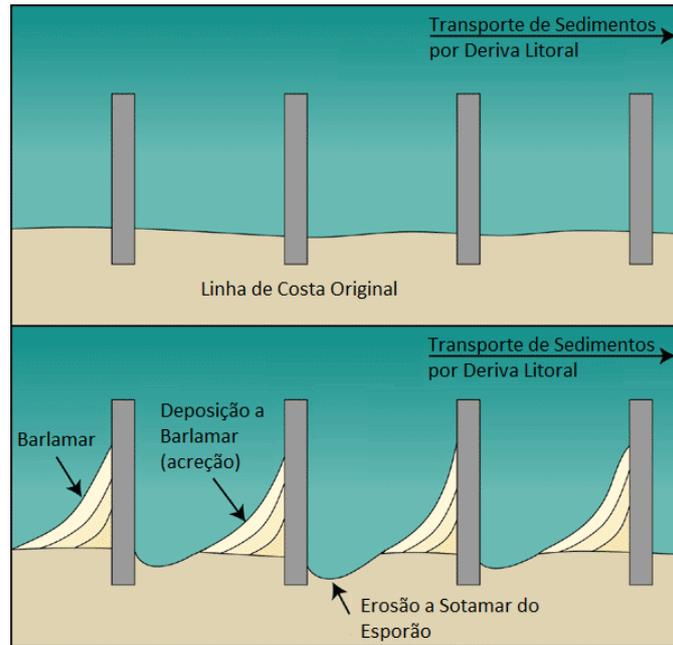


Fig. 2.3 - Evolução do processo erosivo num campo de esporões (adaptado USGS, 2004).

2.2.2. EFEITOS TRANSVERSAIS

A erosão costeira manifesta-se também através de efeitos transversais à costa, que consistem no movimento cumulativo de sedimentos na direção perpendicular à linha de costa, através da ação combinada das ondas e correntes transversais provocados por estas, que resultam numa circulação quase contínua de areia, que pode ocorrer em suspensão na coluna de água ou em fluxos próximos ao fundo do mar (Seymour, 2005).

Enquanto que os efeitos de erosão longitudinal se manifestam lentamente através da transferência de sedimentos de um local para outro da costa, sendo, portanto, dificilmente observados a não ser que existam barreiras físicas que interrompam esse movimento, como esporões ou quebramares, os efeitos transversais de erosão são facilmente visíveis, uma vez que se manifestam mais rapidamente, podendo ocorrer em intervalos de tempo bastante curtos. Na circunstância de se estar perante condições meteorológicas extremas, como tempestades, este intervalo pode ser de apenas algumas horas.

Neste caso, sendo o movimento de sedimentos perpendicular à costa, significa que existe uma perda do volume de areia nas praias e dunas, pois esta é transportada para o largo. Caso o retorno dos sedimentos à praia não ocorra naturalmente, por ação da agitação marítima nos períodos após as tempestades, terão de se adotar medidas de mitigação adequadas sob pena de estes se perderem definitivamente. Algumas destas medidas serão abordadas no capítulo 2.3.

Em períodos de agitação marítima e condições meteorológicas normais, em locais com amplitudes significativas de maré, podem observar-se pequenas alterações no perfil transversal das praias e dunas fruto da ocorrência de transporte transversal de um reduzido volume de sedimentos, provocado pela oscilação do nível da água e rebentação das ondas nesses locais.

Contudo, é na presença de eventos de tempestade que se verificam os maiores efeitos transversais da erosão na costa. Este facto deve-se essencialmente à forte energia de rebentação das ondas que incidem sobre as praias, nestes períodos.

A zona de rebentação é uma região de águas em geral pouco profundas, na qual as ondas de superfície acabam por dissipar a maior parte da energia que lhes foi transferida pelo vento durante a sua geração ao largo (Silva, 2010). A turbulência gerada pela rebentação das ondas aliada ao facto de ser uma zona com profundidades reduzidas, provoca um intenso transporte dos sedimentos do fundo, através das fortes correntes criadas por este processo.

Estas correntes tanto podem transportar os sedimentos ao longo da costa, como na perpendicular a esta, sendo que, dependendo da duração, direção e intensidade destes eventos de tempestade, as consequências ao nível da erosão, poderão ser mais ou menos gravosas.

Apesar do anteriormente referido, a erosão que é provocada pelas tempestades durante o inverno, pode ser parcialmente revertida durante os meses de verão, quando as condições de agitação marítima são menos severas e propícias ao regresso dos sedimentos que ficaram depositados nos fundos marítimos próximos da linha de costa. Esta variação sazonal do perfil das praias e dos cordões dunares é representada na Fig. 2.4.

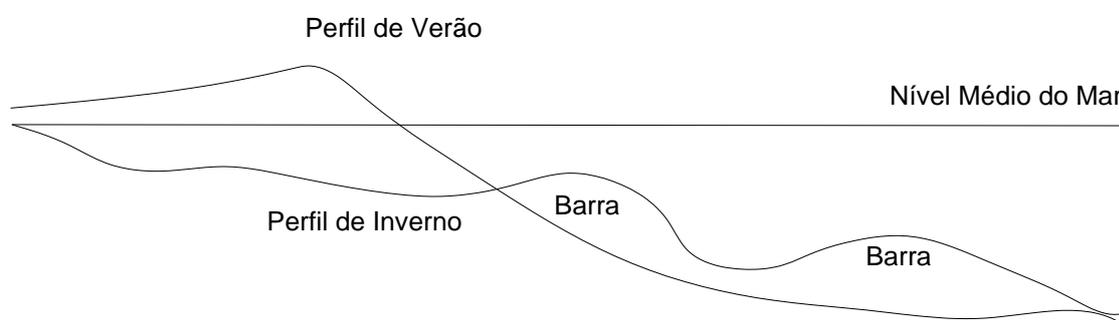


Fig. 2.4 - Variação sazonal do perfil das praias por ocorrência de erosão transversal (adaptado de Seymour, 2005).

Na Fig. 2.4 pretende-se demonstrar que as modificações no perfil transversal de algumas zonas costeiras, podem-se traduzir em diversas situações, uma vez que a migração dos sedimentos irá provocar a erosão de uma parte da costa, principalmente as dunas e as praias, mas poderá contribuir para a uma rápida formação de barras, baixios ou outras formações submersas.

A formação destes elementos submersos nem sempre ocorre, podendo a areia ser transportada para locais bastante distantes do seu ponto de origem, existindo, como já se referiu, uma grande interferência dos processos hidráulicos e morfológicos neste aspeto.

O tema que se irá desenvolver nesta dissertação, incide precisamente na situação em que os processos hidráulicos e morfológicos do local não permitem o natural restabelecimento das condições iniciais da costa após a ocorrência de eventos de erosão. O bloco de proteção costeira, que se pretende conceber no âmbito deste trabalho, funcionará como medida de mitigação, que poderá funcionar de forma isolada ou em conjunto com outras estruturas de proteção costeira como as que se referem no capítulo 2.3. dependendo das características e necessidades do local de implantação. Sendo este bloco, direcionado para a mitigação de problemas de erosão na direção transversal à costa, poderá ser mais vantajoso a sua utilização inserida num plano mais abrangente de proteção costeira que envolva medidas de proteção contra a erosão longitudinal.

Na Fig. 2.5, pode observar-se a evolução do processo erosivo transversal à costa entre 1996 e 2012 em Happisburgh, na costa oeste de Inglaterra, e a presença de estruturas longitudinais e transversais de proteção costeira. Nesta região verifica-se a ocorrência de uma simultaneidade dos efeitos da erosão costeira, sendo necessário recorrer a medidas de mitigação longitudinais e transversais.



Fig. 2.5 - Evolução das alterações da costa, por erosão transversal em Happisburgh, Norwich, na costa oeste de Inglaterra em 1996, 2006 e 2012 (Mike Page, 2012).

2.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

A necessidade de adotar medidas de mitigação da erosão costeira tem crescido ao longo das últimas décadas. Os fatores que contribuíram para este aumento são variados e estão sobretudo associados às atividades humanas realizadas na zona costeira, entre as quais: a pesca, as atividades portuárias, a agricultura e as atividades recreativas de verão, que tiveram no passado e ainda têm atualmente um grande impacto na área costeira. Mas, para além destas causas a nível local, existem também causas a nível global. As alterações climáticas que se registaram nas últimas décadas, produziram grandes mudanças nas zonas costeiras, sendo responsáveis por parte dos problemas de erosão costeira que se verificam atualmente. O aumento da frequência e da intensidade das tempestades e a subida do nível médio da água do mar, são resultado dessas alterações climáticas (Bleck, 2006).

As soluções tradicionais de proteção costeira têm sido largamente utilizadas devido ao crescimento das atividades de recreio e turísticas nas zonas costeiras, que necessitaram de proteção e infraestruturas de apoio. As medidas tradicionais baseiam-se em estruturas rígidas, como os revestimentos e muros (Fig. 2.6), entre outras, que são medidas de proteção passiva da costa e cuja ação afeta substancialmente a dinâmica marítima e costeira natural, o que tem provocado alguma controvérsia na opinião pública e nas associações ligadas à proteção da natureza e da vida animal.

Como alternativa às soluções tradicionais, apareceram medidas de proteção ligeiras e ativas, como a alimentação artificial das praias com areia, os recifes artificiais e o reforço com soluções reversíveis que consistem na utilização de areia confinada por materiais geossintéticos. A proteção ativa contrasta com proteção passiva na medida em que atua sobre a onda antes desta atingir a costa, dissipando parte da energia da onda ao largo, por rebentação, o que faz com que a onda chegue à costa com menor energia, provocando uma menor erosão. Como resultado da dissipação parcial da energia da onda ao largo, as estruturas existentes na costa podem ter menor resistência ao impacto das ondas, sendo estruturas mais esbeltas e menos intrusivas na paisagem e no ambiente natural da costa.

O tempo de vida das obras de proteção costeira, aumentará também de forma significativa, com a redução do grau de exposição aos eventos de condições de agitação extremas, através da utilização de estruturas que dissipem a energia das ondas ao largo.

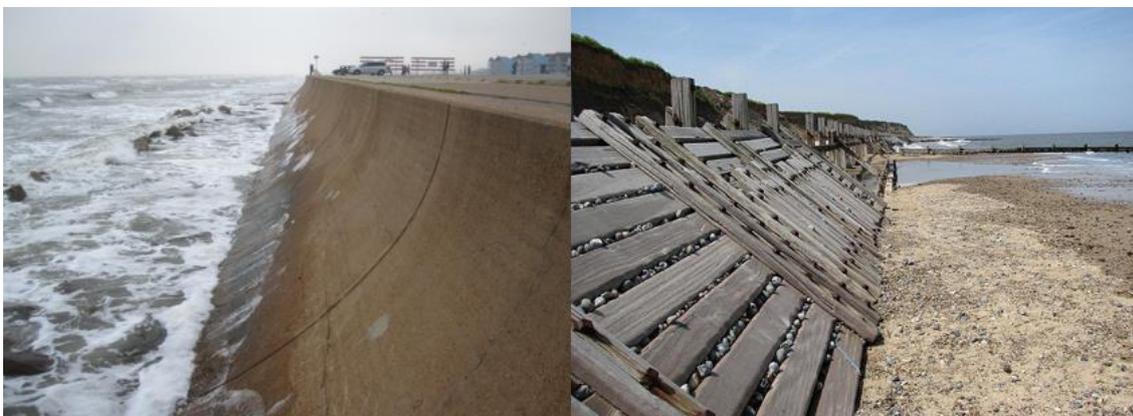


Fig. 2.6 - Obras de defesa aderente em betão (Fitzpatrick, 2013) e em madeira (Happisburgh Project).

Em zonas costeiras arenosas, a alimentação artificial das praias com areia é uma das medidas de proteção ligeira mais frequentemente aplicada na costa, sendo esta uma das medidas que compensa as perdas de areia ocorridas durante os eventos de tempestade. Contudo, devido ao facto dessa areia ser facilmente arrastada para o largo durante a ocorrência de tempestades, é necessário que as operações de alimentação artificial ocorram de forma regular em determinados períodos de tempo. A necessidade de uma manutenção periódica, faz com que o processo de alimentação artificial de praias apresente custos elevados, e requer a existência de areia nas proximidades, caso contrário os custos seriam ainda mais elevados.

Uma forma de proteção complementar, tornando mais eficiente e prolongando o tempo de vida das intervenções de alimentação artificial das praias, é a criação de recifes artificiais ao largo da costa. Estes recifes artificiais são constituídos por estruturas modulares, dispostos ao largo, que atuam sobre as ondas incidentes, promovendo a dissipação antecipada de energia, por rebentação. Estes elementos são estruturas de proteção ativa, uma vez que ao influenciarem a energia de rebentação das ondas na costa, permitem reduzir os efeitos da erosão costeira. Para além do referido anteriormente, esta solução tem outras vantagens, nomeadamente o facto de se tratarem maioritariamente de estruturas submersas, sendo, portanto, invisíveis a partir da linha de costa, faz com que não tenham um impacto negativo na paisagem.

Dependendo da configuração da solução adotada, os recifes artificiais podem ainda ser colonizados pela fauna e a flora marítima, contribuindo para a integração das estruturas de proteção no ecossistema marinho. Apresentam-se, de seguida, alguns exemplos de sistemas modulares utilizados na construção de recifes artificiais, que servirão de base para a conceção de um novo bloco de proteção costeira, que consiga conciliar os principais pontos positivos de cada uma das soluções apresentadas.

2.3.1. SURGEBREAKER

O bloco designado por *Surgebreaker*, foi desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* (1981) e Kakuris (1983), e consiste num bloco modular pré-fabricado em betão armado com um peso aproximado de 2.0 t (Fig. 2.7). Geometricamente, caracteriza-se por módulos triangulares de base retangular com dimensões de 1.2 m de largura e 1.8 m de comprimento e altura de 1.2 m , sendo

o bloco atravessado por 3 aberturas paralelas à base que o perfuram de um lado ao outro com o objetivo de ajudar na dissipação da energia de rebentação das ondas. Estes blocos foram concebidos para funcionarem com uma disposição lado a lado, assentes sobre os fundos, sem qualquer tipo de fundação. A colocação no local que se pretende proteger tem de ser feita através de equipas especializadas, sendo por vezes auxiliadas por helicópteros.

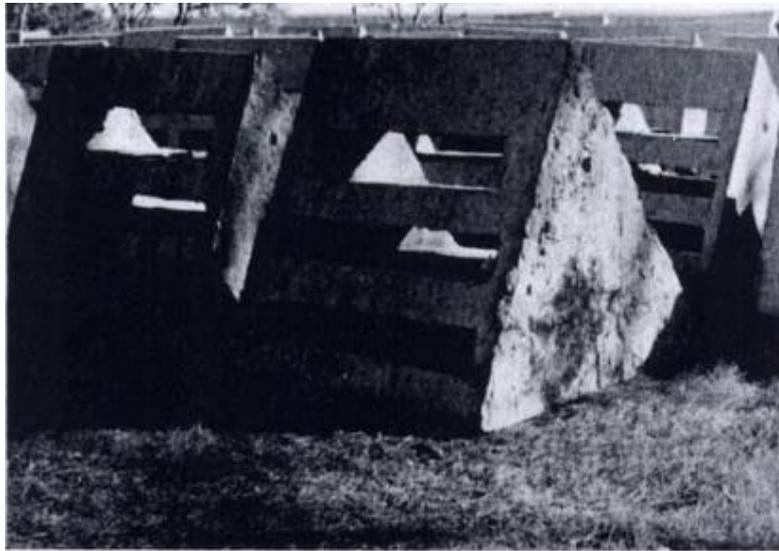


Fig. 2.7 - *Surgebreaker* (Low Cost Shore Protection: US Army, 2004).

Como se observa na Fig. 2.7 e na Fig. 2.8, para adquirir a sua forma triangular o bloco é constituído por duas faces inclinadas nos perfis voltados para sotamar e barlamar, e possui 3 aberturas que perfuram o bloco de um lado ao outro e que o tornam permeável à passagem da água com o fim ajudar na dissipação da energia das ondas, por rebentação e prevenir a erosão da linha de costa.

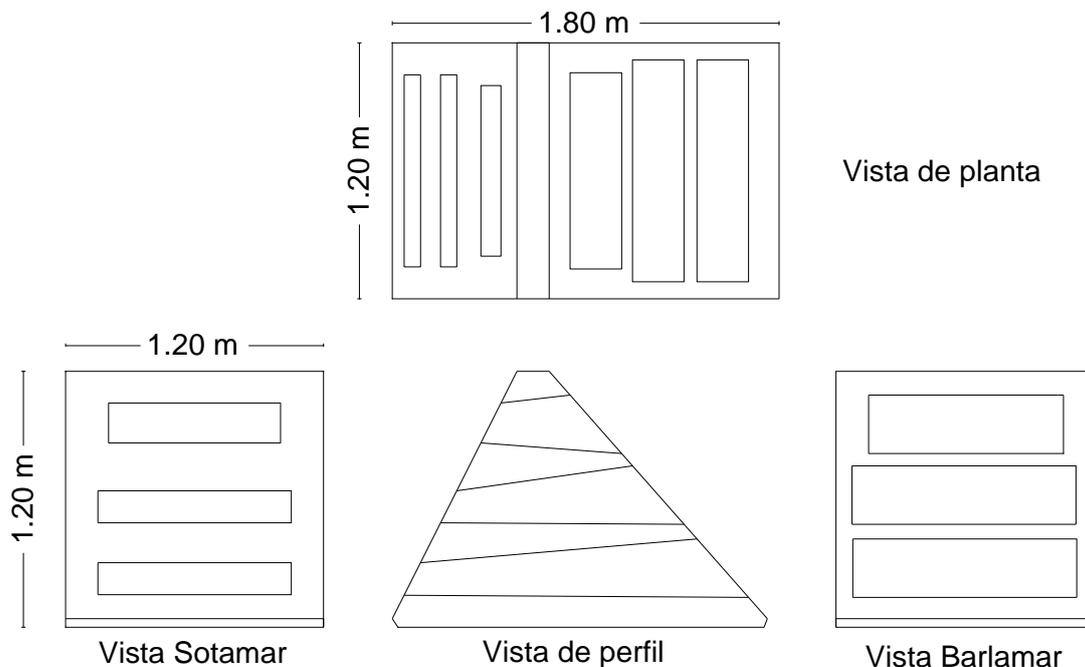


Fig. 2.8 - Aspeto geral do bloco *Surgebreaker* (adaptado de Pilarczyk e Zeidler, 1996).

Esta solução já foi testada com sucesso em vários locais nos Estados Unidos da América, nas décadas de 70 e 80 do século XX, como a costa do Golfo da Flórida, Lake Forest e em vários locais do estado do Illinois, sendo que estas localizações se caracterizam por uma agitação suave a moderada, com alturas de onda incidentes menores que 1.5 m. No caso da Flórida, a comparação dos levantamentos realizados em 1979, ano de início da colocação dos blocos, com levantamentos realizados em 1984 e 1985, mostram uma acumulação de areia e outros sedimentos no sistema modular.

Em Honolulu, no Havai, os testes realizados não mostraram resultados positivos, pois esta localização caracteriza-se por condições de agitação extrema, tendo o sistema modular falhado não só pela ação da agitação, mas também por perda da estabilidade da fundação por escorregamento.

De seguida, sintetizam-se as principais vantagens e desvantagens desta solução.

Vantagens:

- Blocos leves (2.0 t) aproximadamente o peso de 2 carros pequenos, o que facilita a sua colocação no local pretendido;
- Podem ser colocados por helicóptero.

Desvantagens:

- Locais de pequena profundidade de água, tipicamente entre 1 e 2.5 m, e alturas de onda pequenas, não superiores a 1.5 m;
- Não adequado a condições de agitações severas ou extremas;
- Superfície de rebentação lisa (com exceção das perfurações), uma superfície mais rugosa seria mais eficaz na dissipação da energia de rebentação;
- Blocos colocados isoladamente sem qualquer tipo de interligação (possibilidade de se deslocarem do seu local inicial).

2.3.2. BEACHSAVER REEF

O *Beachsaver Reef* (Fig. 2.9) foi desenvolvido pela *Info Breakwaters Internacional*, em 1993 e consiste num bloco pré-fabricado em betão armado, baseado num quebramar submerso simples, com um peso aproximado de 21 t.



Fig. 2.9 - Beachsaver Reef e pormenor do mecanismo de ligação entre módulos (US Army, 2002).

Com dimensões aproximadas de 3.0 m de comprimento, 4.6 m de largura e 1.8 m de altura, os blocos são colocados paralelamente à linha de costa, com o coroamento praticamente coincidente com o nível médio da baixa-mar, com o auxílio de guias ou guindastes sobre plataformas flutuantes. Como se pretende que o bloco fique submerso, poderá ser necessário proceder a escavações para regularizar os fundos, sendo possível ter todos os módulos com a submersão pretendida.

O coroamento dos módulos a sotamar é curvo, possuindo um defletor, com o objetivo de ajudar a orientar a onda incidente para as aberturas horizontais existentes no próprio defletor. A configuração do coroamento é conhecida como “*backwash flame*” pois a sua função é direcionar um jato vertical de água para cima durante o fluxo de retorno da onda (Fig. 2.10). Este fluxo de retorno transporta consigo sedimentos durante os períodos de tempestade. Desta forma o *Beachsaver Reef* atua evitando o arrastamento ou migração para o largo da areia durante os períodos de agitação mais severa, promovendo um ciclo de recirculação da areia.

Testes realizados em 1992, na *Stevens Institute of Technology*, em New Jersey, nos EUA, demonstraram que este bloco limita os movimentos da areia para o largo durante os períodos de agitação extrema ou de tempestade, promovendo ainda o retorno às praias nos períodos mais calmos.

Em 2002, o *Beachsaver Reef* foi testado em Cape May Point, New Jersey, por um conjunto de entidades entre as quais a *US Army Corps of Engineers*, com o objetivo de avaliar o seu comportamento funcional, estrutural e económico. Neste local, o bloco foi colocado sobre fundos à cota -2.74m, ficando o coroamento à cota de -0.91 m, praticamente coincidente com o nível médio da baixa-mar (*MLW-Mean Low Water*), que se localiza à cota -0.87 m. Neste local a amplitude de maré é cerca de 1.52 m, situando-se, portanto, o nível médio da preia-mar (*MHW-Mean High Water*) à cota +0.61m. Estas cota tem como referência a nível zero do NAVD88 (*North America Vertical Datum of 1988*), que corresponde ao nível zero topográfico, para o continente norte americano.

A praia em que foi colocado caracterizava-se por um longo historial de erosão costeira. Uma avaliação realizada um ano após a instalação dos módulos, com base na evolução do perfil da praia e das mudanças da linha de costa, indicou que o *Beachsaver Reef* estabilizou a linha de costa e reteve a areia na zona de influência desejada. Contudo, foram registados alguns problemas de assentamento dos blocos, pois inicialmente apenas tinha sido colocado um filtro de geotêxtil na fundação, sendo posteriormente colocados sacos de betão, para funcionarem como filtro e impedirem o assentamento dos blocos, pois é necessário que a profundidade dos mesmos se mantenha constante.

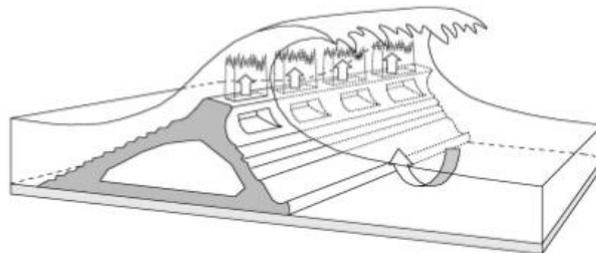


Fig. 2.10 - “*Backwash flame*” em funcionamento (wawtech.net).

Estudos anteriores ao da US Army (2002), indicaram que devido à reduzida largura do coroamento, o *Beachsaver Reef* não é eficaz na atenuação das ondas, como tal no estudo da US Army, o objetivo foi analisar o comportamento na retenção da areia em conjunto com os esporões já existentes. Nos estudos de 1992, os blocos utilizados tinham uma largura do coroamento de 0.31 m, já nos estudos de 2002 da US Army, essa largura foi aumentada para 0.42 m.

Resumem-se agora a principais vantagens e desvantagens do *Beachsaver Reef*.

Vantagens:

- Do ponto de vista ambiental, por ser submerso, não tem impacto na paisagem e atua como um recife artificial, podendo abrigar organismos marinhos no seu interior;
- Estruturalmente cada módulo possui encaixes laterais, que permitem interligar os vários módulos, impedindo assim movimentos laterais, verticais ou horizontais;
- A superfície a barlar é rugosa, o que permite dissipar cerca de 30% da energia das ondas incidentes e ainda evitar uma reflexão significativa de onda;
- Permite a acumulação da areia a sotamar;
- Forma uma corrente de retorno dos sedimentos arrastados durante as tempestades;
- A rugosidade, conjugada com o facto de ser um bloco submerso, para além de reduzir de forma significativa a força da onda incidente na estrutura, permite ainda reduzir o risco de deslizamento da estrutura, para barlar;
- O peso submerso, a largura, o baixo centro de gravidade, a superfície da base irregular (dentada), são características que permitem resistir ao derrube e ao deslizamento;
- Um estudo da Universidade de Delaware, de 1991, refere que o derrube da estrutura no tanque de ondas, ocorreu para forças elevadas, não sendo realista considerar que possam ocorrer na natureza.

Desvantagens:

- Devido ao seu peso de 21 t, necessita de uma fundação que evite o assentamento e também de plataformas flutuantes com equipamento que tenha capacidade para aguentar o seu peso elevado, quando comparado com outros sistemas modulares semelhantes;
- Para manter constante a profundidade, é necessário, por vezes, proceder a escavações nos locais menos profundos;
- Necessita de mergulhadores no apoio à sua colocação, para assegurar o alinhamento dos vários módulos e também o encravamento/encaixe entre os módulos, através de saliências laterais.
- O custo de instalação é difícil de estimar, mas segundo a US Army, deve situar-se à volta de 920 euros, por pé linear (1 pé = 0.3048 m), incluindo as despesas com os mergulhadores.
- Alguns estudos, como o realizado em New Jersey em 1994, referem que devido à largura reduzida do coroamento, o bloco funciona mal enquanto atenuador das ondas incidentes, reduzindo a sua ação apenas em cerca de 10% (Stauble e Tabar 2003).

2.3.3. WAVEBLOCK

O *Waveblock* (Fig. 2.11) é uma estrutura modular em betão armado, desenvolvida por Ortech (1988), ADI Limited (1991) e *Haras et al.* (1993). Possui um peso de 4 t e dimensões da base de 1.22 m por 1.83 m e uma altura de 2.44 m, sendo que tanto as dimensões como o peso podem ser

ajustados para diferentes graus de exposição à ação das ondas, sendo também possível fabricá-los localmente.

Este sistema modular foi dimensionado para dissipar a energia das ondas e simultaneamente reter os sedimentos suspensos transportados por estas. Está em funcionamento em Lake Huron, no Canadá, desde 1987, onde foi instalado a uma profundidade de água de 1.0 m. Esta instalação mostrou-se eficaz na absorção da energia das ondas e na acumulação de areia a sotamar, estabilizando as praias aí situadas. Acumula ainda areia a barlar sem impedir o processo de deriva litoral. Atualmente estes blocos encontram-se totalmente embebidos em areia, estando, portanto, a cumprir a função para a qual foram concebidos.

Os blocos encontram-se em boas condições estruturais, sendo que apenas algumas lajes de betão foram danificadas pelo gelo, havendo ainda alguns sinais de abrasão.

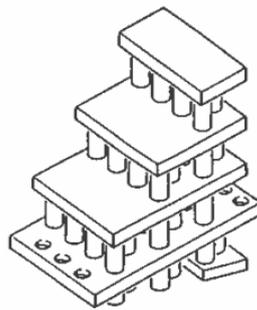


Fig. 2.11 - Ilustração esquemática do Waveblock (Pilarczyk e Zeidler, 1996).

As vantagens e desvantagens desta solução, são as seguintes.

Vantagens:

- Blocos leves e de fácil instalação;
- Blocos submersos, portanto, não têm impacto visual;
- Eficientes na dissipação da energia das ondas e na retenção de sedimentos;
- Podem ser fabricados localmente, evitando o transporte da fábrica para o local da obra.

Desvantagens:

- Geometria de difícil execução;
- Em condições meteorológicas extremas, como no caso da formação de gelo, a estrutura poderá ser danificada.

2.3.4. DRIM-DISTORTED RIPPLE MAT

Este bloco submerso é comercializado sob o nome de *DRIM*, e é pré-fabricado em betão, com baixo relevo, sendo a altura e o comprimento ajustáveis de acordo com as necessidades de cada local onde for utilizado.

Foi desenvolvido no Japão, com contribuições de várias empresas entre as quais a *Nippon Oil Corporation*, e consiste em vários módulos pré-fabricados que se encaixam formando uma superfície ondulada distorcida no fundo do mar. A formação de um par de vórtices assimétricos, induz a criação de uma corrente de fundo na direção transversal à costa, promovendo assim o arrastamento dos sedimentos, cuja concentração próximo dos fundos é bastante elevada, em direção à costa (Fig. 2.12). A formação de uma barreira de areia paralela à linha de costa, ajuda à

estabilização do perfil da praia, bem como promove o crescimento das praias através do avanço da linha de costa, um processo contrário ao que acontece na erosão costeira.

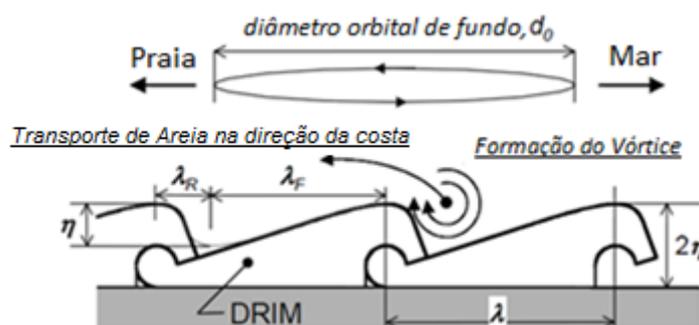


Fig. 2.12 - Esquema de funcionamento do sistema *DRIM* (adaptado de Pilarczyk, 2010).

A capacidade de transporte de sedimentos foi estudada experimental e numericamente, a capacidade de retenção de areia nas praias foi testada numa primeira fase em laboratório e depois no próprio local de implantação, em Ashiya Beach da Fukuoka Prefecture, no Japão.

O protótipo foi instalado ao largo, em alto mar, numa zona onde existem 7 quebramares destacados, a uma profundidade de 3.5m. As dimensões do sistema *DRIM* utilizado eram de 23 m, na direção transversal a costa, constituída por 15 blocos e 12 m na direção paralela à costa, com 12 blocos, o que permite estimar as dimensões de cada bloco 1.53 x 1.0 m. Tendo em conta o esquema apresentado na Fig. 2.12, as dimensões dos parâmetros lambda (λ), distancia entre encaixes e niu (η), que corresponde a meia altura do bloco, utilizados neste caso, foram de 1.5 m e 0.27 m, respetivamente, contudo estes valores poderão ser diferentes para outras localizações.

Esta solução apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Baixo impacto nas condições hidráulicas e ecológicas da zona onde é implantado, ao contrário da maioria das obras de proteção costeira, que ao controlarem diretamente as ondas e as correntes modificam o meio ambiente em redor;
- Diminui a erosão, promove a retenção de sedimentos e o acréscimo de areia nas praias.
- Pelo facto de ser submerso não tem impacto visual na paisagem.

Desvantagens:

- A sua função é mais direcionada para o revestimento e para a retenção dos sedimentos, não sendo indicado para a dissipação da energia das ondas incidentes;
- A superfície da base é lisa, o que não é o mais indicado para prevenir a ocorrência de deslizamentos.

2.3.5. DOUBLE-T SILL

Esta solução é uma estrutura em betão pré-fabricada, de baixo custo, que consiste num sistema modular constituído por uma laje com dois elementos verticais perpendiculares à base, formando um duplo “T” que deu origem ao nome desta estrutura. O peso de cada módulo é de 19 t, tendo as seguintes dimensões: 9.14 m de comprimento e 3.66 m de largura. Esta estrutura é uma inversão da estrutura utilizada correntemente para lajes dos parques de estacionamento. Os elementos verticais de cada módulo estendem-se para fora da laje de forma a possibilitar a interligação entre blocos adjacentes, e a manter o alinhamento inicial das estruturas (Fig. 2.13).



Fig. 2.13 - Vista geral e mecanismo de ligação entre módulos do Double-T Sill (US Army, 2002).

Em 2002, o *Double-T Sill*, tal como o *Beachsaver Reef*, foi também testado em Cape May Point, em New Jersey, por um conjunto de entidades entre as quais a *US Army Corps of Engineers*, sendo que esta solução nunca tinha sido utilizada para prevenção de erosão anteriormente.

O transporte para o local de implantação foi efetuado da mesma forma que o *Beachsaver Reef*, com plataformas flutuantes e gruas, sendo também necessário o recurso a mergulhadores para garantir o alinhamento e a interligação entre os diferentes módulos.

Para este teste a laje foi colocada sobre o fundo a uma profundidade de 2.7 m em relação ao nível médio da água, ficando desta forma a extremidade superior das duas paredes verticais a uma profundidade de 1.9 m da superfície da água.

Apesar de nos testes preliminares não terem sido antecipados problemas de assentamento, ao fim de 6 meses foram registados assentamentos da estrutura. Não foram utilizados filtros, enchimentos ou escavações para a colocação destes módulos. Não foi possível quantificar o assentamento sofrido pelos módulos embora se saiba que estão cobertos por uma camada de 0.61 a 0.91 m de areia. Não se verificaram deslizamentos.

Ao fim de um ano, e ao contrário do *Beachsaver Reef*, não se registou a estabilização da linha de costa nem a retenção de sedimentos, não tendo sido, portanto, eficaz no desempenho da sua função. Apesar da areia que se depositou sobre a estrutura, o acréscimo da areia nas praias foi limitado tendo a linha de costa recuado.

Identificaram-se como principais vantagens e desvantagens do *Double-T Sill* os seguintes pontos.

Vantagens:

- Interligação entre os diferentes módulos;
- Não ocorrência de deslizamentos;
- Estrutura *low-cost*, com preço estimado à volta dos 320 euros por pé linear, incluindo os mergulhadores para o alinhamento dos módulos.

Desvantagens:

- Não dissipa a energia das ondas incidentes;
- Não retém a quantidade desejada de sedimentos;
- Não contribui para a estabilização da linha de costa;
- Permite que a linha de costa continue a recuar;
- Apresenta assentamentos num curto período de tempo;
- A sua geometria não é adequada à dissipação das ondas incidentes.

2.3.6. P.E.P. REEFS – PREFABRICATED EROSION PREVENTION REEF

O P.E.P. Reefs é um sistema modular pré-fabricado em betão armado, baseado num quebramar submerso, com a mesma filosofia do Beachsaver Reef, tendo as dimensões e geometria da secção transversal semelhantes. Com um peso aproximado de 25 t, foi testado com duas configurações diferentes, uma com 7.32 m de comprimento, 3.66 m de largura e 1.52 m de altura e outra com 4.57 m de comprimento, 3.66 m de largura e 1.83 m de altura (Fig. 2.14) e ambas as configurações possuíam um coroamento com uma largura de 0.31 m.

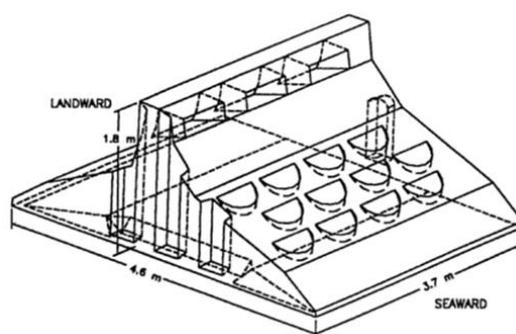


Fig. 2.14 - Esquema geral do P.E.P. Reefs (Stauble, 2002).

O seu objetivo era também reduzir a energia das ondas e a erosão das praias, através da retenção dos sedimentos arrastados em períodos de tempestade, para estabilizar a linha de costa. Os problemas de assentamento são minimizados através da colocação de um colchão de geotêxtil e de um tecido filtrante.

Este bloco possui uma face inclinada voltada para o mar, com o objetivo de provocar o espraiamento e a rebentação da onda antes de atingir a linha de costa, tendo para tal como elemento de apoio um coroamento com 3 aberturas que a atravessam.

O comportamento em relação à transmissão, à reflexão e à dissipação de energia foi avaliado em modelo em laboratório.

O protótipo foi instalado em duas zonas dos EUA, em Vero Beach e Palm Beach no Indian River County. As unidades foram instaladas lado a lado, paralelamente à costa, sendo fixadas umas às outras, para garantir o alinhamento da estrutura. Para além da sua função de reduzir a energia através de rebentação, era suposto os sedimentos ficarem retidos do lado de sotamar para posteriormente retornarem às praias após as tempestades. Devido a problemas de assentamento sofridos pela estrutura, o funcionamento desta não ocorreu como inicialmente planeado, tendo a linha de costa recuado em vez de ter estabilizado, a dissipação da energia de onda incidente foi menor do que a esperada, pois não estava prevista a ocorrência de assentamentos.

A colocação foi realizada através de guias ou guindastes sobre plataformas flutuantes com o auxílio de mergulhadores. Os blocos foram colocados em duas filas paralelas à costa alternadas, uma a 68 m da costa e outra a 80 m, a profundidade dos fundos eram de -2.1 m na fila mais a sotamar e -2.7 na fila mais a barlar, tendo com referência o NGVD 1929 (National Geodetic Vertical Datum of 1929, dos EUA), que é aproximadamente o Nível Médio da Água do Mar (MSL – Mean Sea Level), e situa-se 0.58 m abaixo do nível médio da preia-mar (MHW – Mean High Water) o que resultou numa altura de água acima do coroamento que variava entre 0.30 e 0.90 m nas filas a sotamar e barlar respetivamente, como se verifica no esquema da Fig. 2.15.

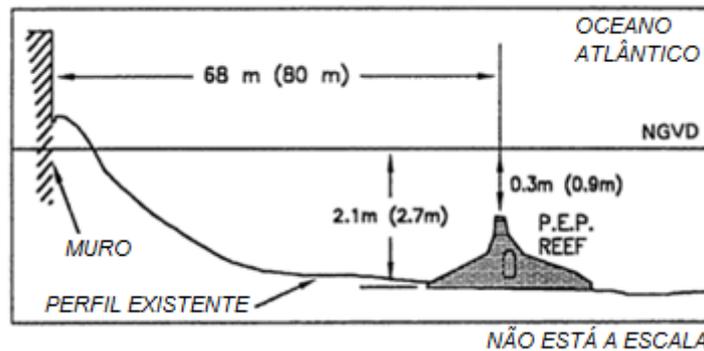


Fig. 2.15 - Esquema de implantação do P.E.P Reefs (adaptado de Coastal Engineering, 1996).

Apresentam-se de seguida as principais vantagens e desvantagens desta solução:

Vantagens:

- Do ponto de vista ambiental, por ser um bloco submerso, não perturba visualmente a paisagem;
- A superfície voltada para o mar é rugosa sendo constituída por 12 pequenas concavidades colocadas de forma desfasada, entre 3 filas sucessivas (Fig. 2.14) que conferem rugosidade ao bloco, o que permite dissipar parte da energia das ondas incidentes e ainda evitar uma reflexão significativa da onda;
- Permite a acumulação de areia a sotamar;
- O peso submerso, a largura e o baixo centro de gravidade são características que permitem resistir ao derrube e ao deslizamento.

Desvantagens:

- Devido ao seu peso de 25 t, necessita de uma fundação que evite o assentamento e também de plataformas flutuantes com equipamento que tenha capacidade para aguentar o seu peso elevado, quando comparado com outros sistemas modulares semelhantes;
- Para manter constante a profundidade, é necessário por vezes proceder a escavações nos locais menos profundos;
- Necessita de mergulhadores no apoio à sua colocação, para assegurar o alinhamento dos vários módulos e também o encaixe entre os módulos, através de das saliências laterais;
- Tal como no caso Beachsaver Reef e tendo em consideração a semelhança entre ambos os blocos, verificou-se que devido à reduzida largura do coroamento, o P.E.P Reefs funciona mal enquanto atenuador das ondas incidentes, reduzindo a sua ação apenas em cerca de 12%, nos casos de estudo no Indian River County;
- No caso analisado em Palm Beach, não conseguiu estabilizar a linha de costa, registando-se recuos e perdas de areia durante o período de utilização.

2.4. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS FACE AO NOVO BLOCO

Com base nas vantagens e desvantagens de cada uma das estruturas modulares apresentadas na secção anterior, foram selecionados os três blocos que se consideram terem as melhores características para servir de base para o desenvolvimento de um novo bloco, as soluções escolhidas foram o *Surgebriker* (2.3.1), o *Beachsaver Reef* (2.3.2) e o *P.E.P. Reefs* (2.3.6).

Foram organizados num quadro (Quadro 2.1) os aspetos dessas soluções que se consideraram relevante replicar ou corrigir no novo bloco: peso, dimensões, submergência, modo de fundação, modo de dissipação da energia de onda, interligação entre blocos adjacentes, modo de colocação e implantação, eficiência na dissipação da energia das ondas, eficiência na retenção dos sedimentos arrastados e características especiais. A Fig. 2.16, representa a que se referem alguns dos conceitos analisados no Quadro 2.1 , como a submergência, a altura e a área da base dos blocos.

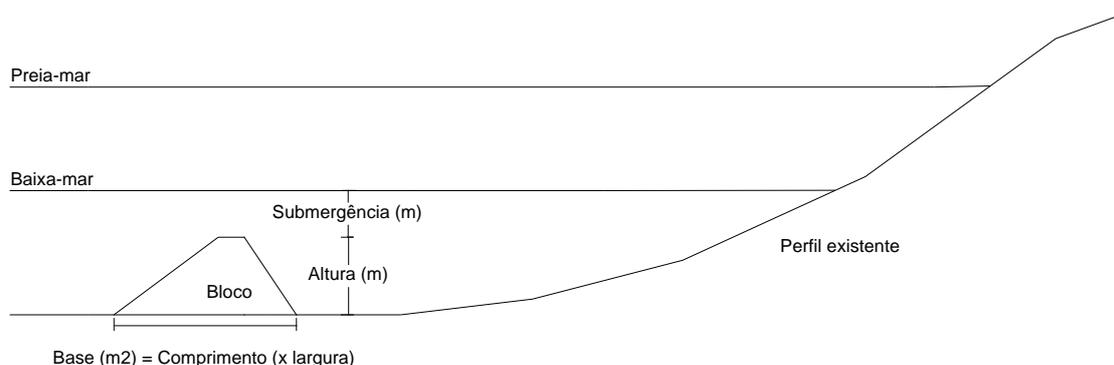


Fig. 2.16 - Esquema geral da implantação dos blocos apresentados (exceto o Surgebreaker).

Quadro 2.1 - Síntese das características dos blocos usados como base no desenvolvimento do novo bloco.

Características	Surgebreaker	Beachsaver Reef	P.E.P. Reef	SWED Block
Peso (t)	2	21	25	-
Base (m ²)	1.2 x 1.8	3.05 x 4.57	(7.32x3.66) (4.57x3.66)	-
Altura (m)	1.2	1.83	1.52 ou 1.83	-
Submergência (m)	São blocos adequados a pequenas profundidades, de 1.0 a 2.5 m, podendo os blocos ficar parcialmente emersos para níveis de água próximos baixa-mar. Submergência varia entre 0.0 e 1.3 m.	O bloco tem o coroamento praticamente coincidente com o nível médio da baixa-mar, contudo deverá ficar submerso, pode ser necessário proceder a escavações	O nível da água acima do coroamento varia entre 0.3 e 0.9 m, entre as filas mais barlar ou a sotamar, em relação ao nível médio da água	Coincidente com o nível de água de baixa-mar. Na situação de preia-mar o bloco ficará submerso.
Tipo de Fundação	Lisa e assente nos fundos, sem filtros	Fundação irregular. Necessita de uma fundação que previna o assentamento dos módulos.	Fundação lisa, necessita de fundação em geotêxtil e de um tecido filtrante para prevenir assentamentos.	Fundação Irregular, elementos contínuos retangulares

Quadro 2.1 - Síntese das características dos blocos base ao desenvolvimento do novo bloco (continuação).

Características	Surgebreaker	Beachsaver Reef	P.E.P. Reef	SWED Block
Modo de dissipação da energia de onda	3 aberturas de diferentes tamanhos atravessam o bloco, a secção vai diminuindo de barlamar para sotamar	Superfície rugosa na face a barlamar e coroamento com 0.42m de largura.	Face voltada a barlamar rugosa, com 12 pequenas covas e coroamento com 0.31 m de largura.	Face rugosa a barlamar, pode ter aberturas ou elementos contínuos salientes
Interligação entre blocos	Não existe interligação entre os blocos adjacentes	Os blocos são interligados por duas saliências de um lado que encaixam em duas reentrâncias no lado oposto.	Interligação lateral, através de reentrâncias e saliências.	Saliência e reentrâncias laterais
Colocação Implantação	A colocação poderá ser efetuada por grua em locais perto da costa, ou por helicóptero	Através de plataformas flutuantes	Através de plataformas flutuantes, equipadas com gruas ou guindastes.	-
Eficiência na dissipação de energia de ondas	Eficiente em locais de agitação moderada, não indicado a locais de agitação extrema	Pouco eficiente, estudos apontam para 10 a 30% na redução da energia das ondas incidentes.	Pouco eficiente devido à reduzida largura do coroamento.	N.A.
Eficiência na retenção de sedimentos arrastados	Eficiente na retenção de sedimentos a sotamar	Bastante eficiente, na retenção dos sedimentos a sotamar	Nos casos estudados (Palm Beach) registou-se um recuo da linha de costa.	N.A.
Caraterísticas especiais	N.A.	Defletor sotamar do coroamento, com aberturas que geram uma corrente de retorno dos sedimentos à praia.	Possui 3 aberturas que atravessam o coroamento, para auxiliar na dissipação da energia das ondas.	Aberturas e/ou deflector no coroamento
Observações	Em situações de agitação extrema, pode ocorrer perda de estabilidade por escorregamento	O interior do bloco é oco, funcionando como um recife artificial, podendo abrigar organismos marinhos no seu interior	Bloco maciço	-

3

DESENVOLVIMENTO DE UM BLOCO INOVADOR

3.1. INTRODUÇÃO

Tendo como ponto de partida o fenómeno da erosão costeira e os efeitos associados à sua ocorrência nas áreas expostas à agitação marítima, surgiu o tema desta dissertação, o desenvolvimento de um bloco inovador de proteção costeira que fosse eficiente na mitigação desses efeitos.

Como se referiu no capítulo 2, existem atualmente diversas medidas de mitigação da erosão costeira, sendo a criação de recifes artificiais constituídos por estruturas modulares uma das soluções já abordadas neste trabalho. Estas estruturas modulares são constituídas por blocos pré-fabricados de betão armado e têm um duplo objetivo: num primeiro momento pretende-se que ajudem a dissipar o máximo da energia das ondas incidentes, designadamente por rebentação e, numa fase posterior, que sirvam de barreira física ao movimento de sedimentos mobilizados durante as tempestades não se afastem das praias, para que estes, posteriormente, possam regressar às praias. Do ponto de vista hidráulico, são estas as duas principais finalidades destas estruturas, no entanto, há outros objetivos que devem ser cumpridos do ponto de vista estrutural e ambiental.

A nível estrutural é importante efetuar a análise da estabilidade da estrutura, visto que esta deverá ser capaz de resistir às ações do mar, sem que ocorram danos significativos ou a sua destruição. Para tal, terão de ser analisados os principais modos de rotura globais (Fig. 3.1):

- Deslizamento;
- Derrube;
- Assentamento da fundação, com deslizamento e rotação a barlar;
- Assentamento da fundação, com deslizamento e rotação a sotamar.

Existem vários métodos para analisar os modos de rotura global das estruturas marítimas e costeiras, contudo o seu campo de aplicação é maioritariamente dirigido ao dimensionamento de quebra-mares verticais e de quebra-mares de taludes. Por esse motivo, quando aplicados a estruturas especiais, como a que se pretende desenvolver, os resultados obtidos aparentam não ser realistas, uma vez são valores muito sobredimensionados, concluindo-se, portanto, ser necessário analisar o comportamento dos blocos experimentalmente através de um estudo em modelo físico.

Em simultâneo, existe uma crescente preocupação em incorporar as questões de índole ambiental nos projetos e obras de melhoria das características do litoral, associadas às funções de proteção,

segurança e prática de atividades desportivas e balneares, o que sugere a aposta em obras submersas ou semi-submersas, como por exemplo os recifes artificiais.

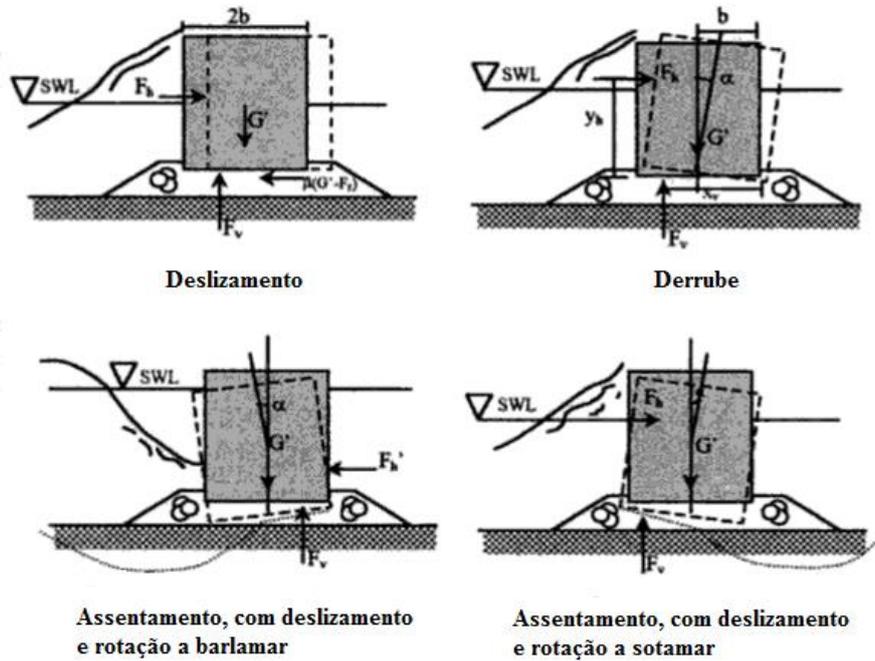


Fig. 3.1 - Modos de Ruptura Global (adaptado de Kamphuis, 2000).

Assumindo esta preocupação a nível ambiental como uma das principais condicionantes das características do bloco inovador, definiu-se que a estrutura a dimensionar seria uma estrutura que deveria estar submersa a maior parte do tempo. Contudo em condições de maré muito excecionais pode ocorrer a emergência parcial da parte superior dos blocos, à semelhança do que acontece com algumas das soluções abordadas no subcapítulo 2.3. Impondo esta condição, fica salvaguardada quer a integridade paisagística, pois mesmo na situação de baixa-mar as estruturas não serão visíveis da costa, quer a prática de atividades desportivas, como surf ou mergulho, entre outros. Ainda que para uma maior segurança na prática destas atividades seja recomendável a colocação de bóias a sinalizar a presença das estruturas. Importa ainda referir que dependendo da geometria da solução escolhida, poderão existir condições favoráveis para a colonização do interior dos blocos pela fauna e flora marítima.

Com base não só nos objetivos hidráulicos, estruturais e ambientais acima descritos, mas também na análise dos pontos positivos e negativos dos blocos atualmente existentes (capítulo 2.3.), desenvolveu-se o *SWED-Block - Submerged Wave Energy Dissipation Block*.

As características hidráulicas e estruturais do *SWED-Block*, são descritas de forma detalhada no seguinte subcapítulo, onde serão justificadas todas as opções tomadas no seu desenvolvimento.

3.2. CARATERÍSTICAS DO *SWED-BLOCK*

Para a definição do novo bloco, realizou-se um trabalho de pesquisa sobre as soluções de blocos de proteção costeira já existentes, onde se procurou saber quais as características geométricas, o funcionamento hidráulico e estrutural, as condições de implantação e os testes em protótipo e em modelo físico reduzido a que foram sujeitos e os respetivos resultados e conclusões obtidas.

Com base nas informações recolhidas, foram enumeradas as características positivas e negativas de cada um dos blocos, para que se pudessem considerar esses pontos positivos na definição do novo bloco denominado de *SWED-Block*, e corrigir as falhas registadas nos blocos já existentes.

Depois da distinção entre os aspetos positivos e negativos de cada bloco, foi definida a geometria inicial da secção transversal. Neste trabalho considerou-se uma geometria triangular com um coroamento de parede vertical no topo, tendo como referência as estruturas modulares *Surgebreaker* (2.3.1), *Beachsaver Reef* (2.3.2) e *P.E.P. Reefs* (2.3.6). Foram definidas também as inclinações dos paramentos de barlar e de sotamar, e as dimensões da base e altura do bloco que se apresentam na Fig. 3.2.

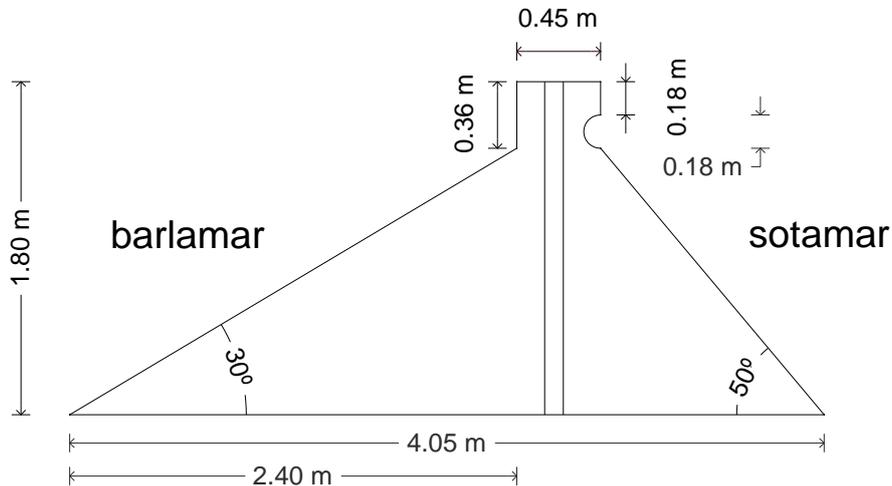


Fig. 3.2 - Secção transversal inicial do protótipo do *SWED-Block*.

Uma vez seleccionados quais os blocos existentes que iriam servir de base para o desenvolvimento de um novo bloco, as principais características dessas soluções que se consideraram relevantes replicar ou corrigir no novo bloco foram organizadas no Quadro 2.1.

Os aspetos analisados foram os seguintes: peso, dimensões, submergência, modo de fundação, modo de dissipação da energia de onda, interligação entre blocos adjacentes, modo de colocação e implantação, eficiência na dissipação da energia das ondas, eficiência na retenção dos sedimentos arrastados e características especiais.

Para além dos aspetos acima referidos, e sabendo que o bloco a desenvolver iria ser testado laboratorialmente, sendo, portanto, necessário construir um modelo à escala, a geometria do bloco foi definida sempre pensando como é que seriam executados os moldes para o modelo. Optou-se, então, por aplicar ao bloco as características que se consideraram ter tido um papel importante no desempenho positivo nas soluções já existentes, mas adaptando-as para que a execução do bloco fosse o mais simples possível.

Estando já definida a secção transversal inicial do novo bloco (Fig. 3.2), que teve como referência, essencialmente, as dimensões e inclinações dos blocos *Beachsaver Reef* e *P.E.P. Reefs*, procedeu-se à análise do funcionamento hidráulico e estrutural do *SWED-Block*.

Sendo a dissipação da energia das ondas o principal objetivo do ponto de vista hidráulico, a configuração do paramento de barlar terá, então, uma importância fundamental no comportamento do bloco, pois este é o primeiro obstáculo que as ondas encontram à sua propagação. Os três blocos que serviram de inspiração ao desenvolvimento do *SWED-Block*, possuem diferentes configurações no seu paramento de barlar: o *Surgebreaker* apresenta um paramento poroso e *Beachsaver Reef* e o *P.E.P. Reefs* rugosos. Optou-se, então, por construir e testar três variantes distintas do *SWED-Block*, com o paramento liso, rugoso e poroso. Estas variações serão abordadas em pormenor nos subcapítulos 3.2.1., 3.2.2. e 3.2.3.

O coroamento é também um elemento presente em dois dos blocos existentes com funções hidráulicas. Os resultados dos testes a que foram sujeitos esses blocos (*Beachsaver Reef* e *P.E.P. Reefs*), permitiram concluir que a eficiência do coroamento não foi a desejada, tendo sido apontada como uma possível razão para esse facto, a reduzida largura do mesmo, que se situava entre 0.30 e 0.40 m. No *SWED-Block* a largura do coroamento foi ligeiramente aumentada para 0.45 m nos modelos liso e rugoso e para 0.80 m no modelo poroso, para analisar a influência do aumento da largura do coroamento na eficiência do bloco em termos de dissipação da energia das ondas. A escolha de uma largura de coroamento diferente para a solução porosa será explicada na secção 3.2.3.

O paramento de sotamar tem a função de responder ao segundo objetivo da estrutura, que é constituir uma barreira física ao movimento transversal dos sedimentos arrastados durante as tempestades da praia para barlar. Nos modelos liso e rugoso adotou-se um paramento inclinado, à semelhança do *Beachsaver Reef* e do *P.E.P. Reefs*, enquanto no modelo poroso optou-se por um paramento vertical, tal como se explica na secção 3.2.3

Estando as questões hidráulicas analisadas, foi então necessário perceber e analisar o funcionamento estrutural do bloco, com vista a garantir a sua estabilidade e a não ocorrência dos modos de rotura globais referidos na secção 3.1 e ilustrados na Fig. 3.1.

Numa primeira fase o pré-dimensionamento do bloco foi feito assemelhando a estrutura a um quebramar vertical. As dimensões do quebramar seriam semelhantes às do bloco, sendo a largura do quebramar igual à largura do coroamento dos blocos e a altura teria o mesmo valor da altura dos blocos. Para analisar a segurança do bloco relativamente ao derrube e ao deslizamento foi utilizado o método de Goda (2000) com as considerações de *Takahashi et al.* (1994), que é o método correntemente utilizado para o dimensionamento de quebramares verticais sob a ação de ondas com rebentação (Fig. 3.3).

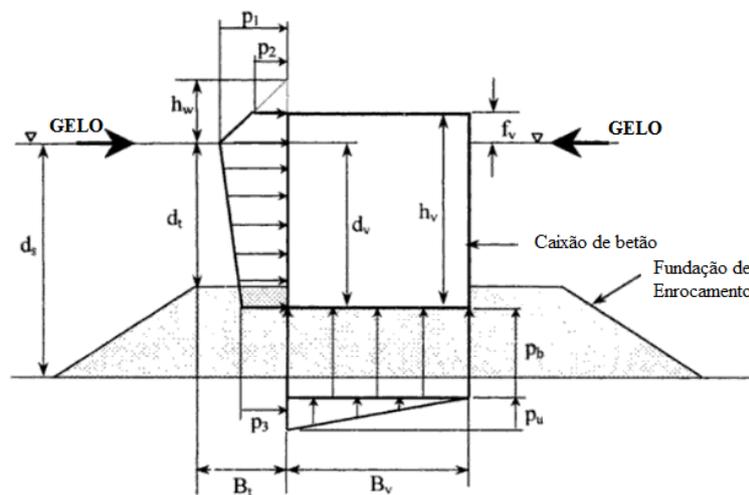


Fig. 3.3 - Esquema da aplicação do método de Goda a um quebramar vertical (Kamphuis, 2002).

Dado que o método de Goda, se trata de um método utilizado para o dimensionamento de outro tipo de estruturas de proteção costeira, já se previa que os valores que se iriam obter seriam um pouco desadequados à estrutura que se estava a dimensionar. Sendo este um método conservativo era expectável a ocorrência de uma sobreavaliação das ações atuantes e como consequência o sobredimensionamento da estrutura. Através da utilização desse método, considerando o bloco com um quebramar com paredes verticais, concluiu-se que o valor do peso dos blocos que garantia

a segurança ao derrube e ao deslizamento era bastante superior ao valor do peso das soluções que serviram de base ao dimensionamento da estrutura.

Este facto pode ser facilmente explicado, uma vez que os efeitos da ação da água sob uma estrutura vertical são significativamente mais gravosos do que sob uma estrutura de taludes. Por outro lado, o impulso da água sob uma estrutura com taludes terá de ser decomposto em duas componentes, sendo que a componente vertical, em princípio, terá um efeito favorável na estabilização do bloco e na verificação dos coeficientes de segurança, assegurando a não ocorrência dos modos de rotura globais anteriormente identificados.

Não sendo, portanto, possível pré-dimensionar o *SWED-Block* através de um método tradicional de dimensionamento de estruturas marítimas, decidiu-se utilizar as dimensões globais de dois dos blocos tidos como referência no estudo, o *Beachsaver Reef* e o *P.E.P. Reefs*, para a conceção do novo bloco.

Do ponto de vista estrutural, pretendeu-se, ainda, corrigir algumas das lacunas observadas nos blocos analisados. Para tal, foram incorporados no novo bloco dois elementos com a finalidade de lhe garantir uma maior estabilidade.

Um desses elementos assegura a interligação entre blocos adjacentes, que era inexistente em algumas das soluções descritas na secção 2.3, e noutras a metodologia utilizada era de difícil execução prática e posterior implantação no local pretendido. Assim, nas três variantes do *SWED-Block* que serão apresentadas nos seguintes subcapítulos, a interligação entre blocos adjacentes será realizada através de um elemento de encaixe que consiste numa reentrância de um dos lados do bloco a que corresponde uma saliência no lado oposto (Fig. 3.4). Este elemento de encaixe atravessa todo o bloco desde a fundação ao topo do coroamento, como se observa através da vista interior do molde de fabricação do modelo liso na Fig. 3.5.



Fig. 3.4 - Ilustração da interligação entre blocos, vista em planta.



Fig. 3.5 - Pormenor da interligação entre blocos no molde de construção do modelo liso, vista de dentro.

O outro elemento que foi inserido na estrutura do *SWED-Block*, foi a uma base irregular, pois verificou-se que nas seis soluções anteriormente apresentadas, apenas uma tinha incorporado uma fundação deste tipo. O bloco *Beachsaver Reef* possui uma superfície da base ondulada (Fig. 2.9), que aumenta o atrito entre a base do bloco e o solo de fundação e pode contribuir para uma diminuição do risco de ocorrência de alguns modos de rotura globais, como o deslizamento, por exemplo.

Como já se mencionou, a conceção da geometria dos blocos teve em consideração, entre outros, a necessidade de simplificação da construção do modelo de laboratório, tendo por isso sido adotado um sistema de fundação semelhante ao existente no bloco *Beachsaver Reef*, mas com linhas e ângulos retos em vez do ondulado original (Fig. 3.6 e Fig. 3.7). As dimensões escolhidas tiveram, também, como um dos principais critérios a facilidade de construção, tendo-se optado por colocar a mesma dimensão para as saliências e para as reentrâncias de 0.80 m, com exceção da saliência central que foi aumentada para 1.25 m, de forma a permitir que a interligação entre blocos adjacentes pudesse chegar até à fundação. As dimensões em protótipo não foram arredondadas pois foram obtidas a partir das dimensões do modelo à escala 1:15, sendo estas medidas exatas.

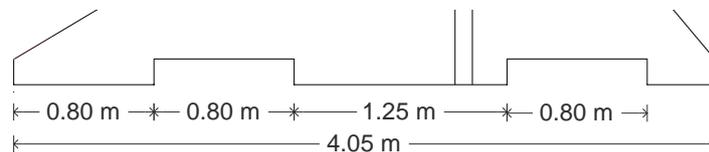


Fig. 3.6 - Fundação do *SWED-Block* e respetivas dimensões no protótipo.



Fig. 3.7 - Molde em madeira para o modelo rugoso, onde são visíveis os elementos que conferem uma fundação irregular aos blocos.

Foram ainda adicionados elementos especiais nos modelos do *SWED-Block*. Por exemplo, nos modelos liso e rugoso foi introduzido um pequeno defletor a sotamar. O modelo poroso, por sua vez, será executado através de uma estrutura com o interior oco e possuirá aberturas nos paramentos de barlar e de sotamar bem como no coroamento. Os motivos que estão na origem da introdução destes elementos especiais, bem como as suas funções, serão descritos nos seguintes subcapítulos.

3.2.1. MODELO LISO

O primeiro modelo do *SWED-Block* não difere muito da secção transversal inicial apresentada na Fig. 3.2, tendo sido apenas adicionados alguns elementos que pretendem melhorar o funcionamento estrutural do bloco (Fig. 3.8).

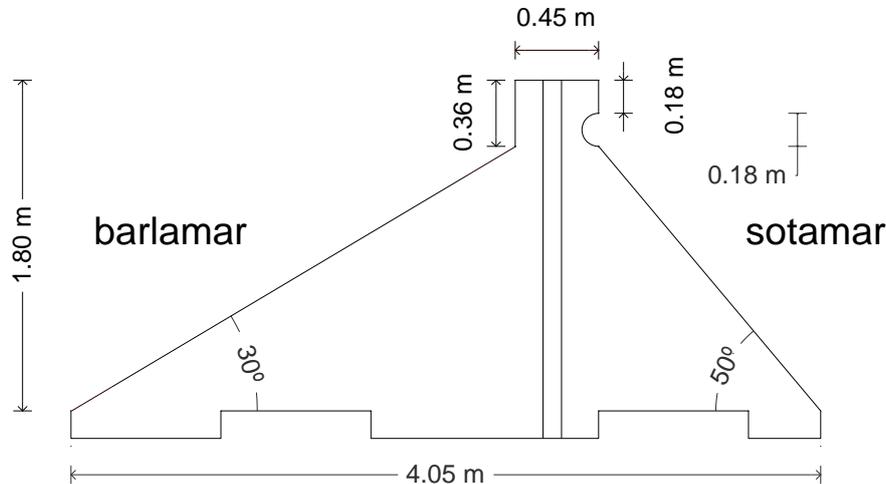


Fig. 3.8 - Ilustração do protótipo do modelo liso do *SWED-Block*.

O paramento de barlamar assume, nesta primeira solução, uma configuração semelhante à do paramento de sotamar, uma vez que ambos possuem uma superfície lisa, diferindo apenas na inclinação do talude.

A consideração de um paramento de barlamar liso permite analisar o funcionamento da estrutura sem quaisquer elementos suplementares de promoção da dissipação da energia das ondas incidentes. Deste modo, a onda ao incidir sobre o paramento de barlamar não irá encontrar nenhum elemento que condicione a sua propagação sendo, portanto, conduzida até à parede vertical do coroamento através da superfície do paramento, e ao embater neste elemento vertical do bloco parte da energia da onda será dissipada.

Assim, o principal objetivo da solução com paramento liso, é o de permitir obter dados que, posteriormente, possam ser comparados com os que serão obtidos nos ensaios dos modelos rugoso e poroso, para se perceber, em que medida, as diferentes configurações do paramento de barlamar têm influência na dissipação da energia das ondas incidentes no bloco.

Este modelo possui elementos de interligação entre blocos (Fig. 3.4) e uma base de superfície irregular (Fig. 3.6), anteriormente descritos, sendo esta a principal diferença relativamente à secção transversal inicial. Possui, ainda, um coroamento com 0.45 m de largura, no qual está localizado um pequeno defletor no lado de sotamar. Com este pequeno elemento, pretende-se analisar a possibilidade da formação de uma corrente de retorno em direção às praias dos sedimentos retidos através do paramento de sotamar do bloco. Contudo, existe a perceção de que dadas as reduzidas dimensões em protótipo do defletor, apenas 0.18 m de diâmetro, a sua influência seja insignificante, ou até mesmo inexistente, para os estados de agitação testados mais severos.

Na Fig. 3.9 e na Fig. 3.10, pode observar-se a representação 3D do modelo liso do bloco, visto dos lados de barlamar e sotamar, respetivamente. Nestas duas figuras é possível perceber de que forma foram integrados os elementos de interligação entre blocos e a fundação irregular.

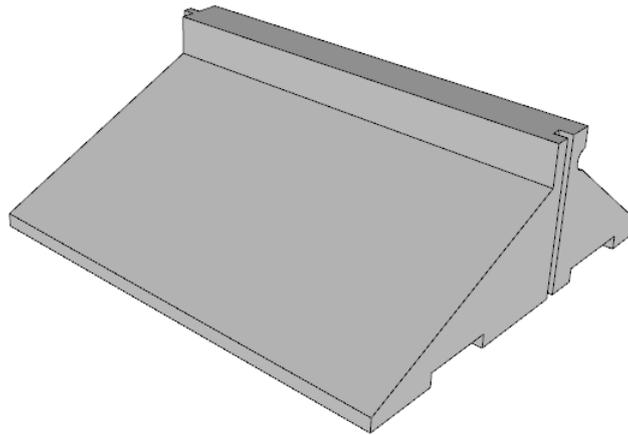


Fig. 3.9 - *SWED-Block*, modelo liso, vista de barlamar e lateral esquerda.

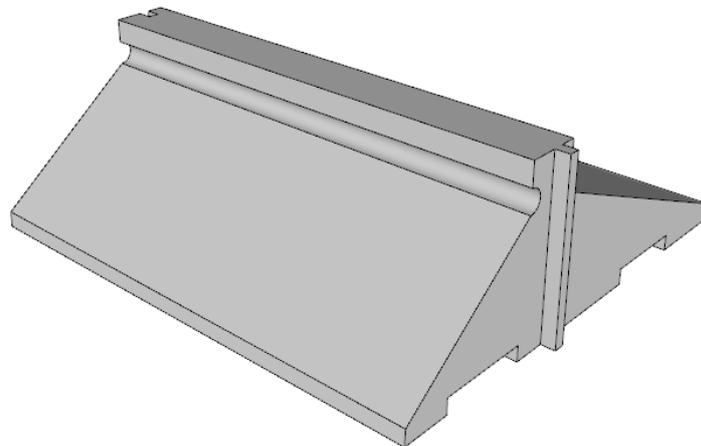


Fig. 3.10 - *SWED-Block*, modelo liso, vista de sotamar e lateral direita.

3.2.2. MODELO RUGOSO

O modelo rugoso do *SWED-Block* é muito semelhante ao modelo liso descrito no subcapítulo anterior, e segue a mesma geometria que foi definida para a secção transversal inicial do bloco (Fig. 3.2). Assim sendo, a fundação, o coroamento, o paramento de sotamar, a interligação entre blocos e a inclinação dos paramentos têm a mesma geometria e dimensões do modelo com paramento de barlamar liso.

A principal diferença deste modelo para a solução lisa é a configuração do paramento de barlamar, e está representada na Fig. 3.11. Como se referiu anteriormente dois dos blocos que serviram de inspiração para o desenvolvimento do *SWED-Block* possuem um paramento de barlamar com superfície rugosa. No caso do *Beachsaver Reef*, a face de barlamar apresenta uma superfície irregular ondulada, enquanto o *P.E.P. Reefs* tem no paramento de barlamar cerca de 12 pequenas concavidades colocadas de forma desfasada, em 3 filas consecutivas. Estes elementos pretendem conferir um certo grau de rugosidade ao paramento, uma vez que em estruturas impermeáveis a dissipação ocorre essencialmente sob a forma de rebentação e, caso a estrutura apresente uma superfície rugosa, também ocorre por atrito.

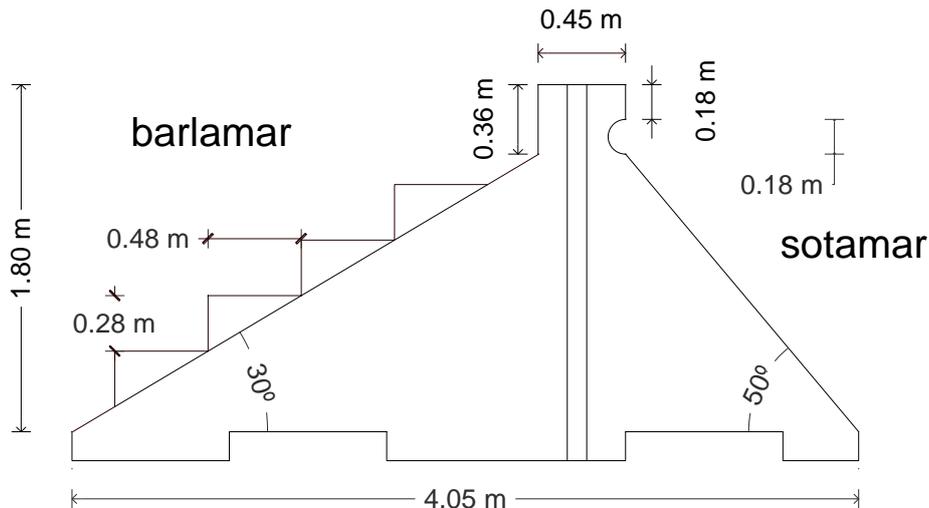


Fig. 3.11 - Ilustração do protótipo do modelo rugoso do *SWED-Block*.

Se for feita uma analogia com o que acontece quando uma onda atinge um quebramar de taludes, facilmente se entende a importância da configuração do paramento de barlamar de estruturas modulares como o *SWED-Block*. Ao atingir o talude do quebramar, a onda tende a espriar-se até atingir o coroamento, caso não encontre nenhum obstáculo à ocorrência desse fenómeno.

Embora no caso dos quebramares de taludes se pretenda reduzir ou evitar o espraimento através da dissipação da energia da onda, para evitar o galgamento da estrutura, o que a acontecer poderia acarretar riscos materiais ou até mesmo humanos. No caso destas estruturas submersas, o galgamento não é um fator relevante, sendo mais importante que tenham um coeficiente de transmissão baixo. Contudo, pretende-se que a dissipação da energia da onda ocorra no paramento de barlamar da estrutura, à imagem do que acontece nos quebramares de taludes.

Sabendo que a permeabilidade, porosidade e rugosidade das estruturas marítimas influenciam significativamente o espraimento, devido à dissipação de energia da onda que podem provocar, desenvolveu-se o modelo rugoso do *SWED-Block*.

Dado que uma estrutura que apresente grande rugosidade provoca grande dissipação de energia, ponderou-se alterar o paramento de barlamar do modelo liso, para obter uma estrutura semelhante, mas com um grau de rugosidade maior.

O paramento de barlamar do bloco rugoso, apresenta uma forma em degraus, sendo estes os elementos que irão conferir rugosidade ao paramento que anteriormente era liso. O número e tamanho dos degraus tem naturalmente influência no grau de rugosidade do paramento, contudo, neste caso, essa escolha foi feita tendo em conta que se pretendia construir um modelo físico à escala 1:15 para o estudo experimental, sendo que as dimensões do protótipo deveriam ser suficientemente grandes para que tivessem alguma expressão quando convertidas para o modelo.

Assim sendo, foram integrados na estrutura quatro degraus, com uma altura de 0.288 m e uma largura de 0.48 m, que quando convertidos para o modelo físico à escala 1:15, ficam com uma altura de 1.92 cm e 3.2 cm de largura.

As Fig. 3.12 e Fig. 3.13 apresentam as representações 3D do paramento de barlamar da estrutura com os degraus que lhe conferem rugosidade, vista de barlamar e de sotamar, respetivamente.

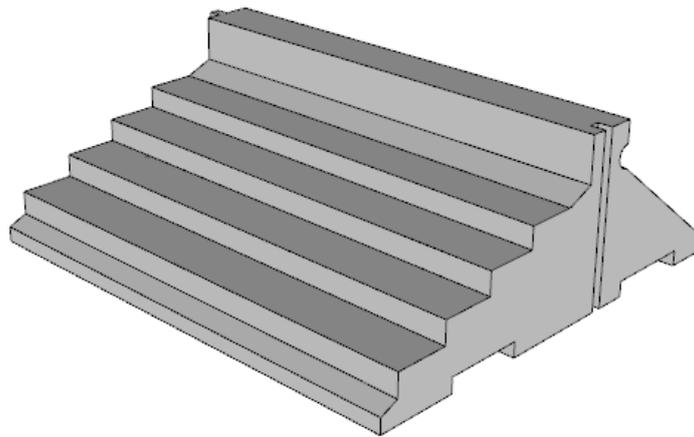


Fig. 3.12 - *SWED-Block*, modelo rugoso, vista de barlamar e lateral esquerda.

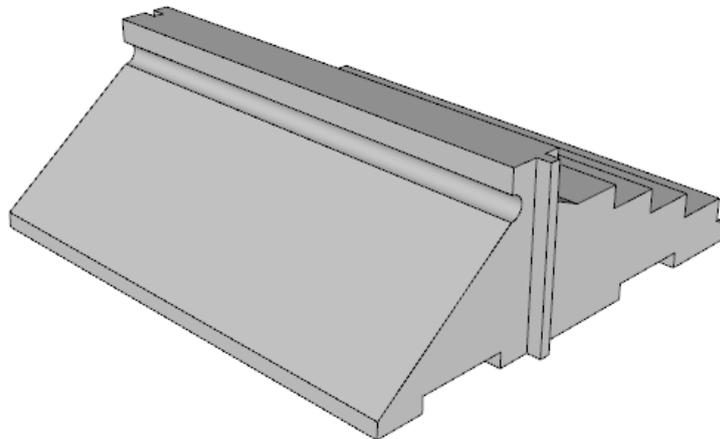


Fig. 3.13 - *SWED-Block*, modelo rugoso, vista de sotamar e lateral direita.

3.2.3. MODELO POROSO

O terceiro modelo desenvolvido para o *SWED-Block*, é aquele que mais se distânciava da geometria inicialmente definida (Fig. 3.2). Devido a este facto, esta solução é bastante diferente dos modelos liso e rugoso que se descreveram nas duas secções anteriores. O motivo principal para uma alteração da geometria tão significativa prende-se como o facto de se pretender desenvolver um modelo poroso para o bloco.

No caso de estruturas porosas, a dissipação da energia da onda ocorre também no interior do meio poroso, devido à turbulência que é gerada no escoamento. Para conferir porosidade ao bloco foram implantadas duas fiadas com sete aberturas no seu paramento de barlamar, com o objetivo de que este se tornasse permeável à água, ao contrário do que sucedia com os outros dois modelos, por se tratarem de blocos maciços.

Este modelo está dotado de um percurso de circulação da água no seu interior que se pretende que permita, de alguma forma, criar alguma turbulência que perturbasse a normal dinâmica de propagação das ondas. Para tal, criou-se um espaço no interior do bloco de forma a que este passasse a ser uma estrutura oca. As aberturas implantadas no paramento de barlamar, foram colocadas de forma a servirem de entrada da água para o interior do bloco.

Para que o circuito de circulação da água no interior do bloco ficasse completo, foi necessário criar outras aberturas, tendo-se acrescentado, uma abertura contínua no topo do coroamento e uma fiada com sete aberturas no paramento de sotamar, com dimensões semelhantes às existentes no paramento de barlamar.

Tanto na face de barlamar como na face de sotamar, o número de aberturas implantado foi de sete por fiada, uma vez que se pretendia que o diâmetro das aberturas bem como o espaçamento entre estas fosse constante. Tendo em conta que o bloco iria ser construído em modelo físico à escala de 1:15, o espaçamento entre aberturas teria de ter uma dimensão suficientemente grande para que este elemento fosse minimamente resistente, e que não quebrasse nem durante o processo de descofragem nem durante a realização dos ensaios laboratoriais, uma vez que no caso do modelo físico, estes elementos não teriam armadura. O diâmetro das aberturas e o espaçamento entre aberturas escolhido foi de 0.40 m, o que faz com que o bloco em protótipo possua um desenvolvimento de 6.0 m. No modelo físico à escala 1:15, o bloco tem 0.40 m de desenvolvimento, o que resulta num diâmetro das aberturas e o espaçamento entre aberturas de 0.027 m. Estas condições influenciaram também o desenvolvimento adotado para os modelos liso e rugoso, pois pretendia-se que estes tivessem as mesmas dimensões que o modelo rugoso.

O objetivo destas aberturas era potenciar a possibilidade de formação do efeito “*backwash flame*”, como acontece com o bloco *Beachsaver Reef*, referido na secção 2.3.2 e representado na Fig. 2.10, no qual se pretende que a água entre no bloco através das aberturas de barlamar, e saia pelas aberturas de sotamar ou pela abertura superior, criando perturbações na propagação das ondas.

A introdução dos elementos que conferem porosidade ao bloco, implicaram uma modificação significativa da secção inicial do bloco. Para além desta passar a ser uma estrutura oca em vez de maciça, a largura do coroamento foi alargada de 0.45 para 0.80 m, de forma a poder comportar a introdução de uma abertura contínua com 0.30 m de largura na parte superior do bloco.

O aumento da largura do coroamento levou à alteração da inclinação do talude do paramento de sotamar, passando este a ser vertical. Esta alteração resulta da necessidade de manter a largura da base, a altura do bloco e a inclinação do paramento de barlamar com as mesmas dimensões que foram adotadas nas secções transversais dos modelos liso e poroso, e que se representam na Fig. 3.14.

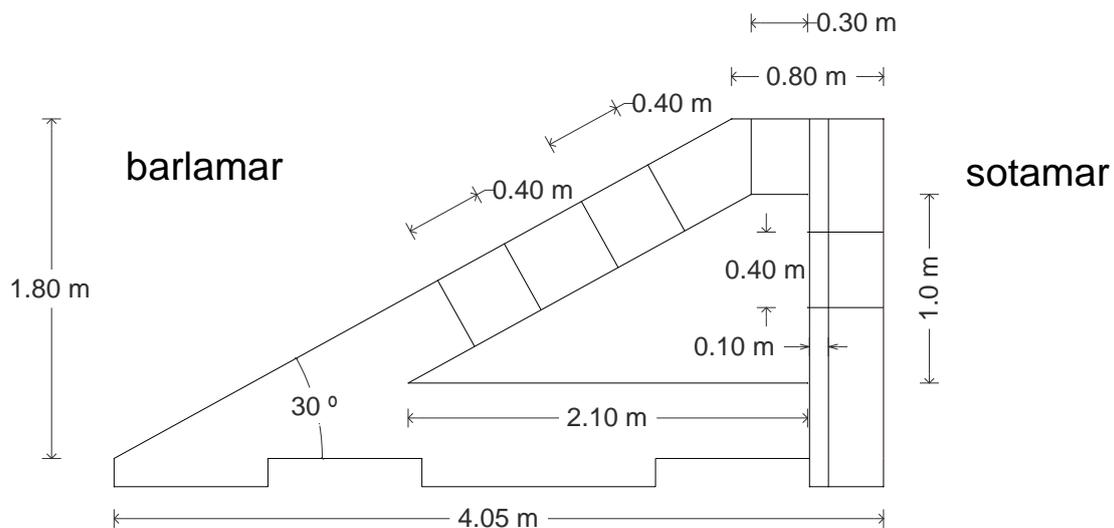


Fig. 3.14 - Ilustração do protótipo do modelo poroso do *SWED-Block*.

O defletor existente no lado de sotamar do coroamento nos outros dois modelos do bloco foi retirado nesta solução, uma vez o coroamento e o paramento de sotamar passaram a ser um elemento único, e se pretendia analisar apenas o funcionamento hidráulico das aberturas implantadas no paramento.

O modelo poroso possui também elementos de interligação entre blocos (Fig. 3.4) e uma base de superfície irregular (Fig. 3.6), que estão presentes nos modelos liso e rugoso. Quanto à base irregular, não foi feita nenhuma alteração relativamente ao que foi utilizado nas outras soluções. A interligação entre blocos, foi deslocada para sotamar, passando a localizar-se na parede do paramento de sotamar, como se observa na Fig. 3.14.

O valor da porosidade é definido pela razão entre a área das aberturas e a área total do paramento de barlar. Para que esta fosse eficiente no caso de uma estrutura vertical perfurada o seu valor deveria variar entre 15% e 40% (Oumeraci, 2001). Tendo em conta que neste bloco o paramento de barlar tem uma inclinação de 30°, e se pretendia a ligação entre o exterior e a secção oca no interior do bloco, o valor da porosidade encontra-se abaixo do intervalo referido.

A porosidade foi calculada com as dimensões em planta do paramento de barlar, que apresenta uma largura de 3.72 m e um comprimento de 6.0 m (Fig. 3.15), a que corresponde uma área total do paramento de 22.3 m². A área das aberturas é de 1.76 m², correspondente à área de 14 círculos com 0.40 m de diâmetro. Para estes valores a porosidade do paramento de barlar é de 7.90%, sendo que de acordo com Oumeraci (2001), deveria ser de pelo menos 15%, para que a solução fosse eficiente.

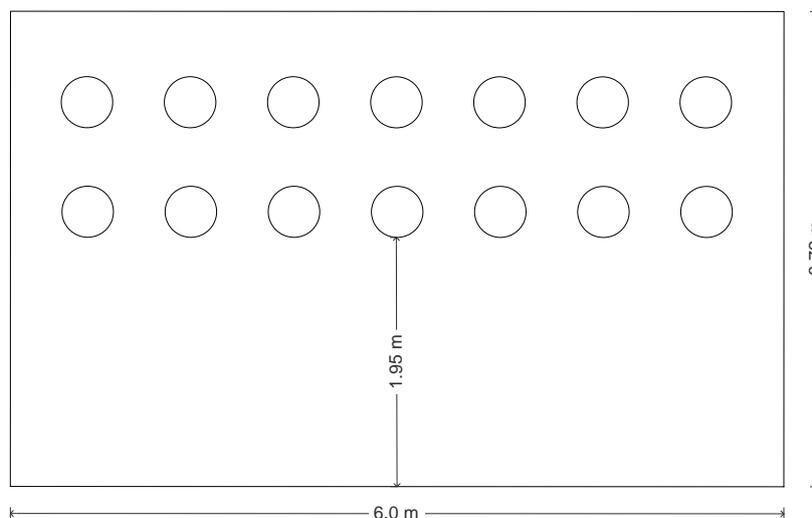


Fig. 3.15 - Vista em planta do paramento de barlar do modelo poroso do SWED-Block (medidas em valores de protótipo)

Apesar do grau de porosidade obtido com esta solução ser apenas de 7.90%, um valor inferior ao mínimo de 15%, esta solução irá ser ensaiada tal como os modelos liso e poroso, para se verificar se mesmo com um reduzido grau de porosidade, é possível dissipar uma parcela significativa da energia das ondas.

No caso dos resultados da dissipação de energia e como consequência da mitigação dos efeitos da erosão, não serem os desejados, serão estudadas e sugeridas algumas formas de otimização da estrutura para obter um maior grau de porosidade.

Se no cálculo da porosidade da face de barlar do bloco apenas for tida em consideração a parte ativa do paramento da estrutura (Fig. 3.16), que possui uma largura de 2.17 m e um comprimento de 6.0 m, a que corresponde uma área de 13.02 m², e mantendo a mesma área de aberturas de 1.76 m², o valor da porosidade do paramento de barlar sobe para 13.52 %, um valor ainda assim inferior ao mínimo de 15%.

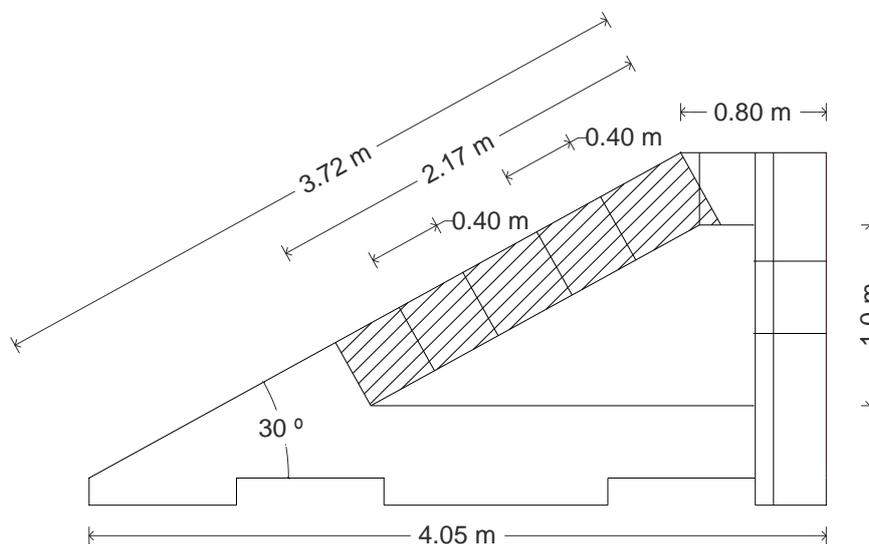


Fig. 3.16 - Área ativa do paramento de barlar do modelo poroso do SWED-Block (dimensões em protótipo).

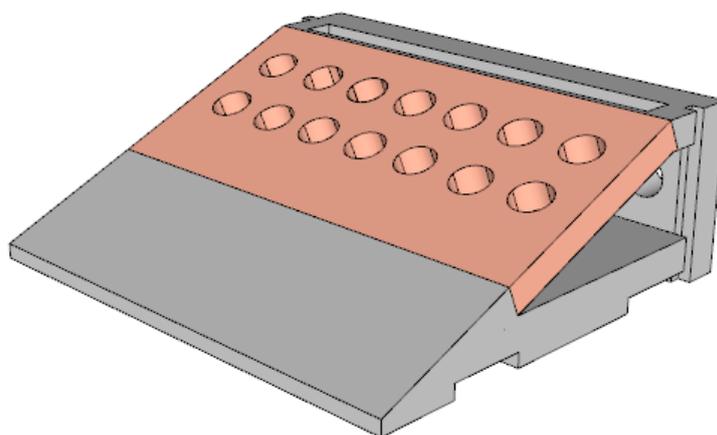


Fig. 3.17 - Representação 3D do modelo poroso do SWED-Block, destacando a área ativa do paramento de barlar (zona vermelha).

Na Fig. 3.18 e na Fig. 3.19 que se seguem pode ser observada a representação em 3D do modelo poroso do *SWED-Block*, onde são visíveis as aberturas circulares, nos paramentos de barlar e de sotamar, bem como a abertura contínua no topo do coroamento.

Na Fig. 3.20 são visíveis o interior, a interligação entre blocos e a superfície da base do modelo poroso do *SWED-Block*.

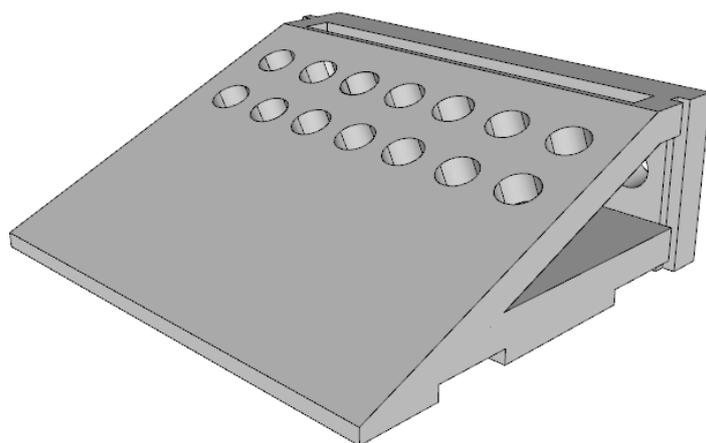


Fig. 3.18 - *SWED-Block*, modelo poroso, vista de barlamar e lateral esquerda.

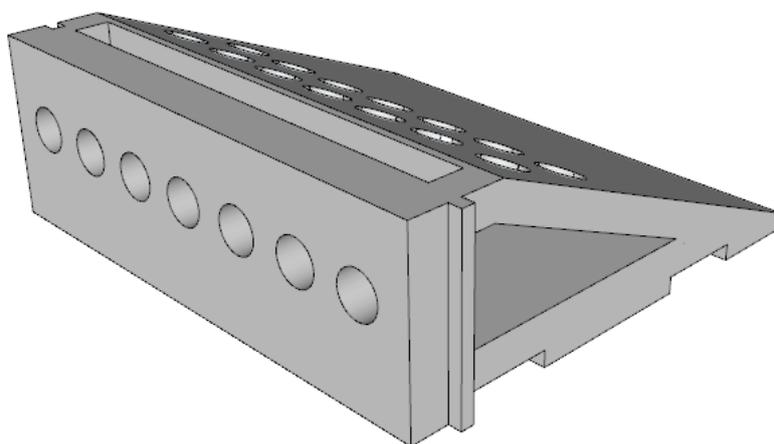


Fig. 3.19 - *SWED-Block*, modelo poroso, vista de sotamar e lateral direita.

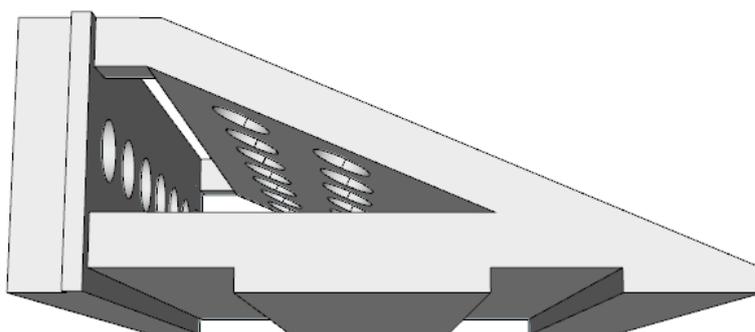


Fig. 3.20 - *SWED-Block*, modelo poroso, vista de lado direito.

4

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL 2D E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. ENQUADRAMENTO

Os métodos de dimensionamento de estruturas marítimas e portuárias são, de uma forma geral, sustentados por fórmulas empíricas. Este facto reduz substancialmente o seu campo de aplicação, uma vez que as fórmulas são desenvolvidas de acordo com determinados pressupostos que podem não ser replicáveis em casos com características diferentes, como por exemplo geometria, condições meteorológicas, condições de agitação marítima, entre outras.

Cada vez é mais frequente o desenvolvimento de estruturas de proteção costeira com geometrias muito diversas, com vista a poderem ser adaptados aos diferentes locais de implantação e a responderem da melhor forma possível às solicitações a que são sujeitas. Dadas as variantes que podem existir para cada uma dessas estruturas, torna-se frequentemente inviável a utilização dos métodos empíricos existentes, pois estes não foram desenvolvidos para responder a essas necessidades, sendo a gama de resultados que apresentam, desadequados para os casos em estudo.

Este problema verificou-se, como se mencionou anteriormente neste documento, quando se pretendia avaliar as solicitações a que a estrutura do *SWED-Block* estaria sujeita, por aplicação do método de Goda. Ora, este método foi desenvolvido para o dimensionamento de quebramares verticais, estruturas nas quais a superfície em contacto com a ação da água é, como o próprio nome indica, vertical. No caso do bloco que se está a desenvolver, o paramento de barlamar apresenta um ângulo de 30° em relação à horizontal, portanto, a interação entre as ondas e a estrutura não se processa da mesma forma, não podendo ser utilizado o método referido para paramentos verticais.

Não sendo possível dimensionar e avaliar a estabilidade do novo bloco através dos métodos empíricos existentes, optou-se por analisar essas questões experimentalmente através de ensaios em modelo físico reduzido. Os testes foram realizados com os modelos reduzidos à escala geométrica de 1:15, tendo em vista a avaliação do comportamento hidráulico do *SWED-Block*, na mitigação dos efeitos de erosão costeira numa praia.

Os modelos foram construídos, respeitando a geometria definida para o protótipo. A sua construção realizou-se na oficina do Laboratório de Hidráulica da FEUP, para construir os moldes de cofragem que deram forma aos blocos foram usadas placas de madeira MDF (*Medium-Density Fiberboard*).

Posteriormente foi efetuado o enchimento dos moldes com argamassa (mistura de cimento, água e areia). A descofragem foi realizada 3 dias após o enchimento, ficando depois os blocos expostos ao ar na nave do laboratório, para que secassem totalmente antes de serem alvo de ensaios. A sequência construtiva utilizada está ilustrada na Fig. 4.1, compreendeu as seguintes fases:

- 1- Secção transversal, defletor e interligação entre blocos;
- 2- Paramentos de barlar e sotamar, e coroamento;
- 3- Betonagem com argamassa;
- 4- Bloco a secar ao ar após a descofragem (cura do betão).



Fig. 4.1 - Sequência construtiva dos modelos do *SWED-Block*.

4.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

4.2.1. DESCRIÇÃO GERAL DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Com os modelos do *SWED-Block* construídos à escala geométrica 1:15, procedeu-se à realização dos ensaios laboratoriais, que decorreram no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FEUP, e que se apresenta na Fig. 4.2.

O tanque de ondas tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade máxima de 1.20 m e encontra-se equipado com um sistema de geração de ondas multi-elemento, constituído por 16 pás independentes, que ocupam toda a largura do tanque, tendo cada pá aproximadamente 0.75 m.



Fig. 4.2 - Visão geral do tanque de ondas, pás geradoras, praia de enrocamento e sala de controlo.

Concebido pela *HR Wallingford (UK)*, este sistema de geradores pode funcionar em conjunto ou em movimentos singulares, permitindo simular diversos estados de mar 2D e 3D. O estudo 2D é realizado através da colocação de divisórias verticais paralelas e próximas das paredes laterais, formando um canal com a largura correspondente ao número de pás que se pretende utilizar.

Nos ensaios a que foram sujeitos os modelos do *SWED-Block*, foi utilizado um canal com aproximadamente 0.80 m de largura, que corresponde à largura de uma pá e às folgas laterais entre a pá e a parede lateral do tanque e a divisória vertical. A localização deste canal no tanque de ondas está representada na Fig. 4.3. A largura do canal pode variar ao longo do ensaio devido à oscilação provocada pela agitação da água nas placas divisórias verticais de acrílico.

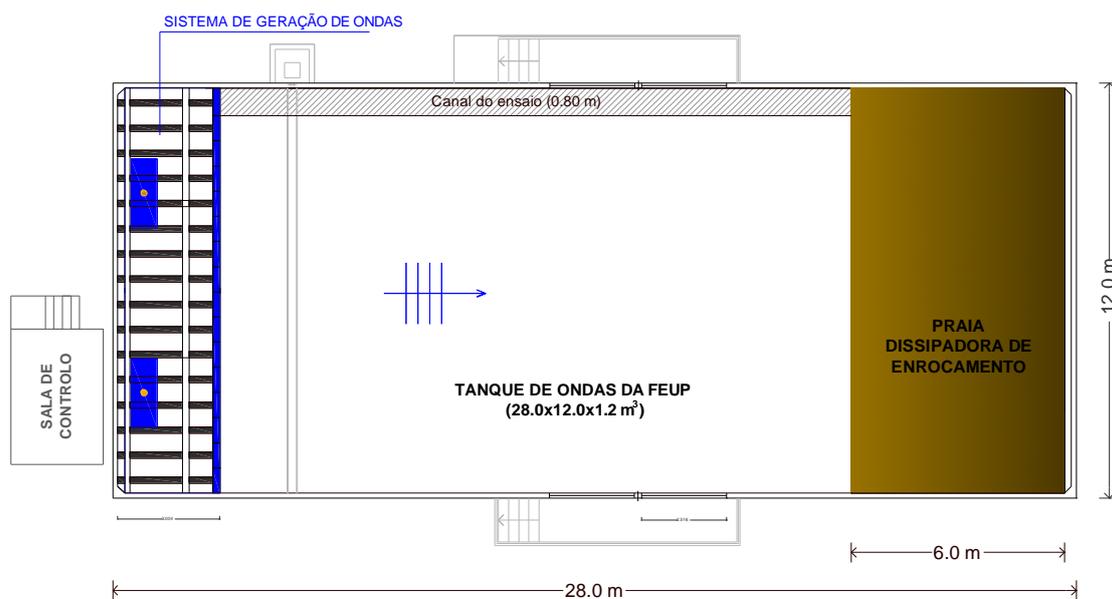


Fig. 4.3 - Esquema do tanque de ondas da FEUP, com o canal de 0.80 m de largura, onde se realizaram os ensaios.

O tanque possui ainda uma praia dissipadora com 8.35 m de desenvolvimento, localizada junto à parede oposta aos batedores de ondas, que tem como função dissipar a energia de agitação e minimizar as reflexões da agitação. O movimento das pás é controlado a partir da sala de controlo num computador com o software *HR Wave Generation Control*, que está ligado ao gerador através da unidade de controlo apresentada na Fig. 4.4. Este é responsável por monitorizar o movimento dos batedores criando assim o estado de agitação com as características pretendidas. O software solicita as condições de agitação que se pretendem reproduzir, sendo estas posteriormente conduzidas sob a forma de um sinal que é convertido, através de uma função de transferência, em movimentos horizontais das pás (Fig. 4.5). Podem ser gerados estados de agitação regulares e irregulares, dependendo do movimento efetuado pelas pás.



Fig. 4.4 - Aparelho gerador do movimento efetuado pelas pás.



Fig. 4.5 - Pormenor das pás, e dos elementos metálicos verticais parte integrante do mecanismo ativo de absorção da reflexão.

O sistema de geração incorporado um mecanismo ativo de absorção da reflexão, o *Dynamic Wave Absorption (DWA)*, que permite assegurar que a energia das ondas refletidas pelo modelo físico é absorvida no momento em estas ondas atingem o sistema de geração. Através deste mecanismo fica garantido que as condições de agitação presentes no interior do tanque de ondas são apenas o resultado da combinação das ondas geradas pelo sistema, com aquelas que são refletidas pelo modelo. A diferença entre a onda solicitada ao sistema e a onda refletida, corresponde à onda que se gerou.

A aquisição de dados relativos ao nível instantâneo da superfície livre da água no canal, é feita através de sondas de níveis hidrodinâmicos instaladas ao longo do canal de ensaio, que se ilustra na Fig. 4.6. Estas sondas adquirem séries temporais de valores de voltagem que, por calibração, são convertidos em registos instantâneos de elevação da superfície livre da água, permitindo perceber as características da agitação no interior do tanque. O software que permite a aquisição dos dados e a calibração das sondas é o *HR-DAQ – Data Acquisition and Analysis Software Program*.



Fig. 4.6 - Sondas instaladas no canal de ensaios, sendo visível ao fundo o batedor utilizado.

Uma vez que o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um bloco de proteção costeira, é importante perceber e analisar a influência deste nos processos de erosão ou acreção ao longo de uma praia. O levantamento das cotas a que se encontra a praia será efetuado com o auxílio de um perfilador 2D, o *HR Wallingford 2-D Bed Profiler* (Fig. 4.7), que permite medir a cota em determinado local para que se possa traçar os diferentes perfis transversais desta e comparar a sua evolução ao longo dos ensaios.

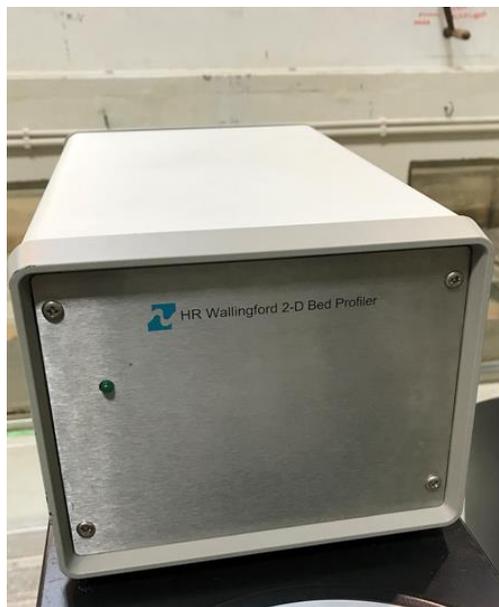


Fig. 4.7 - Instrumento de aquisição dos dados do perfilador 2D.

Este aparelho desloca-se sobre um carril com um comprimento máximo de 4.0 m (Fig. 4.8), e através de uma haste que se move na vertical permite determinar a posição do nível da areia em relação ao ponto inicial da haste. É possível definir o espaçamento máximo entre pontos medidos

através da escolha da distância a percorrer pelo elemento de suporte do perfilador (Fig. 4.9) e o número de pontos que se pretende medir.



Fig. 4.8 - Carril por onde se desloca o elemento de suporte do perfilador.



Fig. 4.9 - Elemento de suporte (azul) e haste vertical.

4.2.2. INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Como se referiu anteriormente, os ensaios dos modelos do *SWED-Block* decorreram num canal instalado no tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP. Neste canal, com aproximadamente 0.80 m de largura e com um comprimento correspondente à quase totalidade da extensão do tanque, foram instalados os equipamentos de apoio aos ensaios descritos na secção 4.2.1, localizados entre a posição de repouso dos batedores e o final da praia dissipadora de enrocamento, numa extensão de menor que 28.0 m.

No canal foi construída uma praia de areia com duas inclinações diferentes ao longo da sua extensão. Na maior parte do seu comprimento, a praia estava assente sobre o fundo do tanque que possui a superfície horizontal, sendo, portanto, fácil a construção de uma praia com uma inclinação pretendida. Esta extensão da praia, com cerca de 8.90 m, tinha uma inclinação constante de 5%, e começava a cerca de 7.20 m dos batedores, terminando no local onde se encontra com a praia de enrocamento com 8.35 m de comprimento. Neste local, a praia tinha uma espessura de areia de cerca de 0.45 m, sendo esta a espessura máxima de areia em toda a extensão da praia. Por cima da praia dissipadora de enrocamento, tentou-se que a praia acompanhasse a inclinação existente, mantendo sempre uma espessura de areia entre 0.20 e 0.25 m. Esta foi a espessura considerada adequada para que quando ocorresse a erosão da praia, provocada pela rebentação das ondas, não se perdesse a totalidade da areia, ficando o geotêxtil colocado entre a praia de areia e a praia de enrocamento a descoberto.

Na Fig. 4.10, é possível ver a sequência construtiva da praia de areia, designadamente:

1. Canal sem praia
2. Colocação de geotêxtil
3. Colocação da areia
4. Praia concluída



Fig. 4.10 - Sequência construtiva da praia de areia utilizada nos ensaios do *SWED-Block*.

No espaço compreendido entre os batedores e o início da praia de areia foram colocadas quatro sondas de níveis hidrodinâmicos (Fig. 4.6). A extensão total deste trecho inicial do canal era de 7.70 m, tendo a primeira sonda ficado instalada a cerca de 4.45 m do batedor. As sondas encontravam-se com diferentes espaçamentos entre si, ocupando uma extensão total de 3.0 m, entre a primeira e a última sonda. A disposição e o espaçamento entre sondas são descritos no Quadro 4.1 e representados na Fig. 4.11.

Quadro 4.1 - Posicionamento e espaçamento das sondas de níveis hidrodinâmicos.

Sonda	Posição (m)	Espaçamento (m)
S1	0.000	0.675
S2	0.675	1.100
S3	1.775	1.225
S4	3.000	

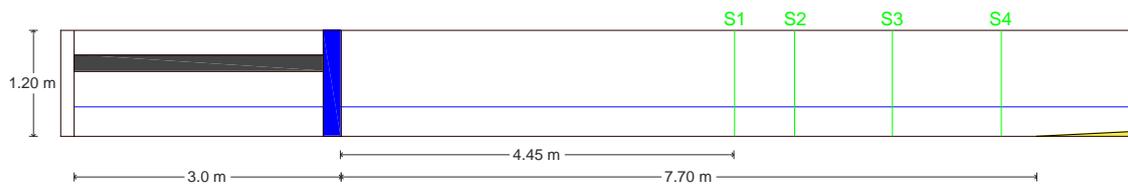


Fig. 4.11 - Troço do canal com a disposição das sondas entre o bateror (azul) e o início da praia.

O espaçamento entre sondas foi definido de forma a que estas abrangessem a gama de frequências correspondente às condições de agitação marítima pretendidas para os dois níveis de maré, que se apresentam na secção 4.3. No Quadro 4.2 estão descritos os intervalos de frequências medidos pelas quatro sondas utilizadas:

Quadro 4.2 - Gama de frequências abrangidas pelas sondas para os dois níveis de maré

Profundidade de água (m)	Frequências (Hz)
0.33	0.084
	0.596
0.60	0.113
	0.701

O outro equipamento utilizado de aquisição de dados relativos aos ensaios foi um perfilador 2D (Fig. 4.9), instalado na extensão final da praia, de forma a cobrir a quase totalidade da zona a sotamar do local onde foram colocados os blocos dos diferentes modelos do *SWED-Block*. Foram utilizados 2 carris como o que se apresenta na Fig. 4.8, uma vez que o comprimento útil de cada um dos carris é de 4.0 m, e a extensão que se pretendia analisar era superior a esse comprimento. O primeiro carril foi instalado a aproximadamente 0.40 m a sotamar do local onde se posicionaram os blocos, próximo do local onde se localiza o pilar que divide as duas janelas de observação do tanque de ondas. Esta localização foi escolhida pelo facto de não ser possível filmar do exterior a evolução do perfil da praia neste local precisamente por existir o pilar entre as duas janelas de observação. Assim, a evolução do perfil transversal da praia a sotamar deste local foi analisada com base nos pontos recolhidos pelo perfilador 2D, nas restantes zonas a sotamar, a barlar e sob o bloco que são visíveis a partir da janela de observação do tanque com 2.52 m, a análise pode ser feita em vídeo, no formato *timelapse*. Apesar de no conjunto dos dois carris utilizados se dispor de 8.0 m de comprimento útil, este não foi usado na totalidade por limitações físicas do equipamento, uma vez que a altura máxima a que a haste do perfilador se podia elevar era inferior à altura da camada de areia na parte final, já sobre a praia de enrocamento. Foi então utilizada uma extensão de 6.0 m de carril como se demonstra na Fig. 4.12.

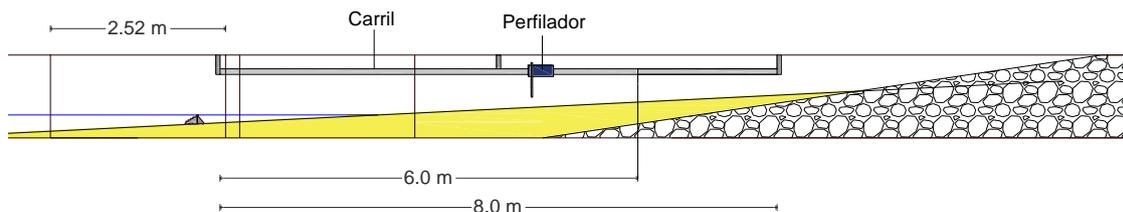


Fig. 4.12 - Ilustração esquemática da instalação do perfilador 2D no canal de ensaios.

4.3. PLANO DE ENSAIOS

Os ensaios laboratoriais que foram realizados aos três modelos do *SWED-Block*, foram planeados de forma a permitir analisar a eficiência hidráulica e a estabilidade de cada um dos modelos quando sujeitos a diferentes condições de agitação marítima.

Os blocos foram submetidos a testes com estados de mar de intensidade crescente, para avaliar o comportamento da estrutura, sob a ação das mesmas. A agitação utilizada foi do tipo irregular, tendo como base o espectro de *Jonswap*.

Para estes estados de agitação marítima, os modelos do *SWED-Block* foram testados para dois níveis de maré distintos: +0.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), que correspondem, respetivamente, aos níveis característicos de Baixa-Mar (BM) e de Preia-Mar (PM) para a costa ocidental portuguesa. De forma a que as condições de agitação marítima fossem semelhantes para os dois níveis de maré, os valores do período de pico, T_p , e de altura de onda significativa incidente, H_{si} , foram os mesmos para os níveis de BM e de PM. Sendo o nível de PM aquele que permite que se desenvolvam as condições de agitação mais desfavoráveis a um bom comportamento hidráulico e à estabilidade do bloco, foi considerado um período de pico mais gravoso a que corresponde a uma maior altura de onda significativa incidente.

Como já foi referido no capítulo em que se caracterizaram os modelos do *SWED-Block*, a escala geométrica, λ_L , utilizada neste trabalho foi de 1:15. De acordo com o critério de semelhança de *Froude*, em escoamentos com superfície livre, a escala dos tempos λ_T é igual à raiz quadrada da escala geométrica, λ_L , o que resulta na seguinte relação:

$$\lambda_L = \frac{1}{15} \quad \lambda_T = \lambda_L^{1/2} = \left(\frac{1}{15}\right)^{1/2} = \frac{\sqrt{15}}{15} \quad (4.1)$$

No Quadro 4.3, apresentam-se as condições de agitação marítima irregular utilizadas nos ensaios, para os dois níveis de maré, em valores de protótipo e de modelo físico obtidos através das escalas geométrica e do tempo apresentadas anteriormente.

Quadro 4.3 - Ondas irregulares consideradas no estudo (espectro *Jonswap*).

Protótipo			Modelo Físico		
Nível (m)	T_p (s)	H_{si} (m)	Profundidade de água (m)	T_p (s)	H_{si} (m)
+0.00 (Z.H.)	9.00	0.90	0.33	2.32	0.06
	11.00	1.20		2.84	0.08
	13.00	1.50		3.36	0.10
+4.00 (Z.H.)	9.00	0.90	0.60	2.32	0.06
	11.00	1.20		2.84	0.08
	13.00	1.50		3.36	0.10
	16.00	1.95		4.13	0.13

Às condições de agitação que se resumem no Quadro 4.3, foram sequencialmente submetidos todos os modelos do *SWED-Block* descritos na secção 3.2. Para os modelos rugoso e poroso, foram utilizados dois módulos com 0.40 m de comprimento cada um. Para o modelo liso foram testadas duas configurações diferentes da estrutura: uma com dois blocos com 0.40 m de comprimento, tal com os outros modelos, e outra com dois blocos com 0.20 m de comprimento. Os dois blocos com 0.40 m, foram utilizados para que os resultados dos seus ensaios pudessem ser comparados com os resultados dos modelos rugoso e poroso, em iguais condições. Os blocos de 0.20 m foram desenvolvidos para avaliar o comportamento isolado de cada estrutura no caso de ocorrerem situações de erosão localizada ao longo dos 0.80 m de largura do canal.

Foram também realizados ensaios com as mesmas condições de agitação, mas sem a presença dos blocos. O objetivo destes ensaios era obter dados relativos às alterações no perfil transversal da praia sem a presença dos blocos, para que se pudessem comparar os resultados com os obtidos na presença dos diferentes modelos do bloco. Esta comparação é que vai permitir perceber qual a influência que a presença destas estruturas tem no processo de erosão e acreção do perfil transversal da praia.

Assim sendo, a sequência de ensaios definida para o estudo, tem por base as condições presentes no Quadro 4.3 e compreende as seguintes etapas:

- Praia desprotegida, sem blocos de proteção;
- Praia protegida por dois blocos do modelo liso com 0.40 m de comprimento;
- Praia protegida por dois blocos do modelo rugoso com 0.40 m de comprimento;
- Praia protegida por dois blocos do modelo poroso com 0.40 m de comprimento;
- Praia protegida por dois blocos com 0.20 m e um bloco 0.40 m do modelo liso de comprimento.

Eram primeiro testados os blocos para o nível de baixa-mar e depois de preia-mar. Sendo que sempre que se pretendia efetuar alterações ao nível de maré ou ao modelo de bloco a ensaiar, eram efetuadas as seguintes tarefas:

- Medição do perfil da praia pós-ensaio;
- Esvaziamento do tanque;
- Reconstrução da praia para a inclinação inicial;
- Colocação dos blocos na posição inicial;
- Medição do perfil da praia pré-ensaio;
- Enchimento do tanque;
- Calibração das sondas de níveis hidrodinâmicos para o nível de maré pretendido.

Tendo em conta as sete diferentes condições de agitação e a sequência de ensaios descritos, foram realizados, no total, 35 ensaios. Nestes ensaios, com ondas irregulares, foi utilizada uma sequência temporal de comprimento 2^{13} que, à qual corresponde um tempo de ciclo, para cada um dos períodos de pico, T_p , utilizados dado por:

$$\text{tempo de ciclo} = \frac{T_p}{8} \times 2^{13} \quad (4.2)$$

Dividindo o ciclo temporal dado pela equação 4.2, pelo período de pico, T_p , obtém-se o número de ondas aproximado, gerado pelo sistema de geração dos batedores em cada ensaio. Para a sequência temporal de 13, o número de ondas que se esperava que os batedores gerassem em cada em ensaio era de 1024 ondas.

No Quadro 4.4, apresenta-se o tempo de ciclo e o número de ondas gerado para cada período de pico, com agitação irregular.

Quadro 4.4 - Número de ondas esperado nos ensaios com agitação irregular.

Nível (m)	T_p (s)	Tempo de ciclo (s)	Nº ondas
0.33 (BM)	2.32	2375.68	1024
	2.84	2908.16	1024
	3.36	3440.64	1024
0.60 (PM)	2.32	2375.68	1024
	2.84	2908.16	1024
	3.36	3440.64	1024
	4.13	4229.12	1024

O comprimento da sequência temporal que permitiu determinar a duração dos ensaios foi definido de forma a garantir que os ensaios tinham uma duração suficiente, para garantir que os estados de agitação irregular eram reproduzidos com suficiente rigor. Assim, é possível obter uma correta representação da realidade do comportamento hidráulico e da estabilidade dos blocos.

Apesar da duração dos testes ter sido definida de forma a ter, em cada teste, aproximadamente 1000 ondas (Quadro 4.4), durante a realização dos ensaios reparou-se que o sistema de aquisição dos dados recolhidos pelas sondas de níveis hidrodinâmicos tinha um atraso de aproximadamente 10 minutos, relativamente à duração pretendida para cada ensaio. Como o sistema de aquisição de dados das sondas e o sistema de geração das ondas funcionam em computadores independentes, o atraso não se verificou no sistema de geração, o que resultou na geração e teste dos modelos para um número de ondas superior ao pretendido. Em relação à aquisição de dados das sondas, este atraso não tem consequências, uma vez que o sistema regista apenas as medições relativas às ondas que ocorrem durante a duração do ensaio pretendida, parando de adquirir os valores medidos quando esta duração é atingida. Quanto às medições efetuadas ao perfil da praia, estas representam as alterações provocadas por um número de ondas superior às 1024 ondas que se pretendia gerar.

Os resultados obtidos relativos à análise da reflexão e às alterações do perfil transversal da praia serão discutidos e analisados no seguinte capítulo.

4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Através dos equipamentos de medição que foram instalados ao longo do canal de ensaios foi possível recolher dados relativos às ondas geradas, a sua interação com as diferentes estruturas dissipadoras de energia existentes ao longo do canal, como são os blocos e a praia, e às ondas refletidas por estas estruturas. Parte desses dados serão analisados na secção 4.4.1, onde será feita a análise da reflexão.

Serão também analisados os dados relativos às alterações do perfil transversal da praia a sotamar das estruturas modulares do *SWED-Block*, com recurso às medições efetuadas com o perfilador 2D e filmagens efetuadas na zona envolvente ao bloco.

4.4.1. ANÁLISE DA REFLEXÃO

Todas as estruturas que interagem com a agitação marítima, não só dissipam como ocorre com os modelos do *SWED-Block*, mas também refletem parte da energia incidente para o largo, uma vez que não têm capacidade de absorver ou dissipar a totalidade da energia incidente sobre si. Dependendo de parâmetros como a permeabilidade, a rugosidade, a porosidade e a inclinação do talude da estrutura sobre a qual a onda incide, maior ou menor será a quantidade de energia refletida. A reflexão depende ainda das características da própria onda, tais como a declividade e a altura de onda relativa, que são respetivamente, o quociente entre altura de onda, H , e o comprimento de onda, L , e o quociente entre a altura de onda, H , e a profundidade de água, d . Mas depende também porque se está a trabalhar com ondas irregular da altura de onda significativa, H_{si} , e do período de pico, T_p .

A energia refletida pode criar problemas em algumas estruturas marítimas ou portuárias, uma vez que provoca um aumento da perturbação das ondas, o que pode provocar problemas de navegabilidade nas operações de manobra dentro dos portos, ou até mesmo potenciar a erosão da fundação das estruturas marítimas e portuárias, como a que se está a desenvolver neste trabalho.

Em estruturas verticais impermeáveis este problema é particularmente grave uma vez que praticamente a totalidade da onda incidente é refletida para o largo. Situação inversa ocorre em estruturas porosas de inclinação suave, que permita o espraçamento da onda e a dissipação da energia da onda incidente, evitando que esta seja refletida.

Através das sondas de níveis hidrodinâmicos (Fig. 4.6) instaladas no canal de ensaios é possível medir a elevação da superfície livre da água e determinar a alturas de onda significativa incidente e refletidas.

Com estes dados é possível calcular o coeficiente de reflexão, C_R , que está relacionado com a reflexão que está a ocorrer no canal de ensaios, por via da interação das ondas incidentes com os blocos e a praia. Este coeficiente resulta do quociente entre a altura de onda significativa refletida, H_{sr} , e a altura de onda significativa incidente, H_{si} :

$$C_R = \frac{H_{sr}}{H_{si}} \quad (4.3)$$

Dado que nos ensaios efetuados as ondas para além de interagir com os blocos e com a praia, interagem ainda com as pás do sistema de geração das ondas, percebe-se, então, a importância de o sistema incorporar o mecanismo ativo de absorção da reflexão, referido na secção 4.2.1. Assim, fica assegurado que a energia das ondas refletidas pelo modelo físico é absorvida no momento em que estas ondas atingem o sistema de geração, não sendo novamente refletida em conjunto com a onda incidente gerada.

Para proceder à separação da agitação incidente da agitação refletida, o software utilizado, parte integrante do sistema de aquisição dos dados da agitação marítima, baseia-se no registo das elevações instantâneas da superfície livre da água medidas nos quatro pontos onde se localizam os quatro instrumentos de medida (Fig. 4.11). É importante garantir que o posicionamento relativo das sondas é o correto, ou seja, estas terão de estar situadas num local com uma profundidade de água constante e devidamente afastadas, daí o seu posicionamento antes da praia dissipadora de areia e afastadas dos elementos refletores. O posicionamento das sondas deve ainda ter em conta um intervalo de frequência que inclua a gama de frequências da onda a gerar em cada um dos ensaios. O posicionamento das sondas é conseguido através de um processo iterativo em que se fixam as distâncias entre as quatro sondas chegando ao posicionamento que se apresentou no Quadro 4.1.

Apesar de não haver uma regra específica em relação ao posicionamento da sonda mais próxima da estrutura refletora em análise (sonda S4, na Fig. 4.11), neste caso as estruturas são módulos do *SWED-Block*, é recomendável que esta se situe pelo menos à distância de um comprimento de onda em relação à estrutura. Neste caso, o comprimento de onda foi calculado para o período de pico mais elevado de 16 s.

4.4.2. RESULTADOS DA ANÁLISE DE REFLEXÃO

4.4.2.1. Variação do coeficiente de reflexão com a alteração das condições de agitação.

Neste capítulo será analisada a evolução do coeficiente de reflexão, em função da altura da onda incidente e dos períodos de pico associados (Quadro 4.3), para os diferentes modelos do *SWED-Block* que foram testados em laboratório. Serão ainda apresentados os gráficos da variação do C_R em função de um parâmetro adimensional, que relaciona a altura de onda significativa incidente, H_{si} , a aceleração gravítica, g , e o período de pico, T_p .

Como se explicou na descrição do plano de trabalhos, os primeiros ensaios realizados foram com a praia desprotegida, isto é, sem a presença de qualquer modelo do bloco. Nestas condições, foi possível obter informações relativas à agitação marítima, em particular sobre a agitação refletida, sem a influência de outras estruturas dissipadoras para além da própria praia.

Através dos dados recolhidos foi possível perceber e registar que a variação do coeficiente de reflexão, C_R , é também influenciada pela variação do nível de maré, pelo aumento da altura de onda e pelo respetivo aumento do período da onda e não apenas pela presença ou não das estruturas dissipadoras como o *SWED-Block*.

Na Fig. 4.13 apresenta-se o gráfico comparativo da variação do coeficiente de reflexão para o nível de baixa-mar, que corresponde a uma profundidade igual a 0.33 m, e para o nível de preia-mar, a uma profundidade de 0.60 m, para a praia desprotegida.

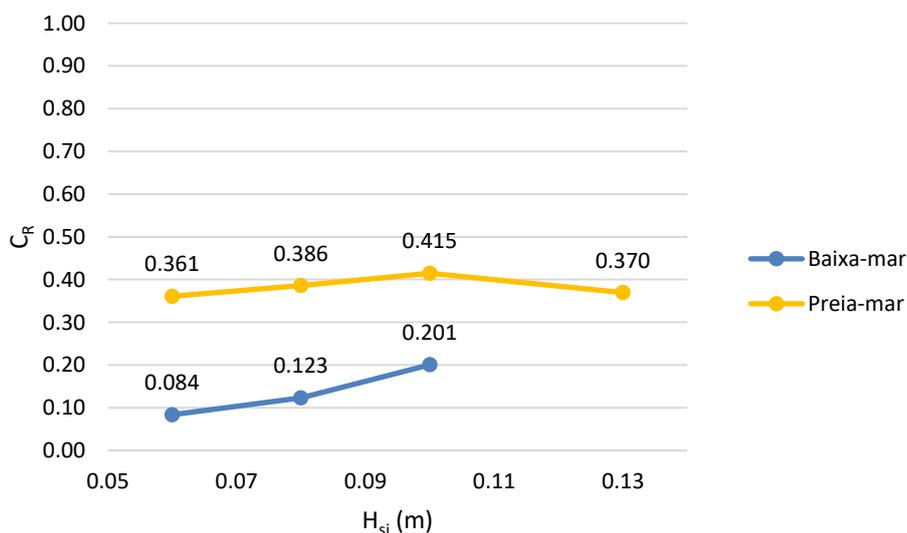


Fig. 4.13 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda para a praia desprotegida (valores em modelo).

Na Fig. 4.14 é apresentada a variação do C_R , em função do parâmetro adimensional.

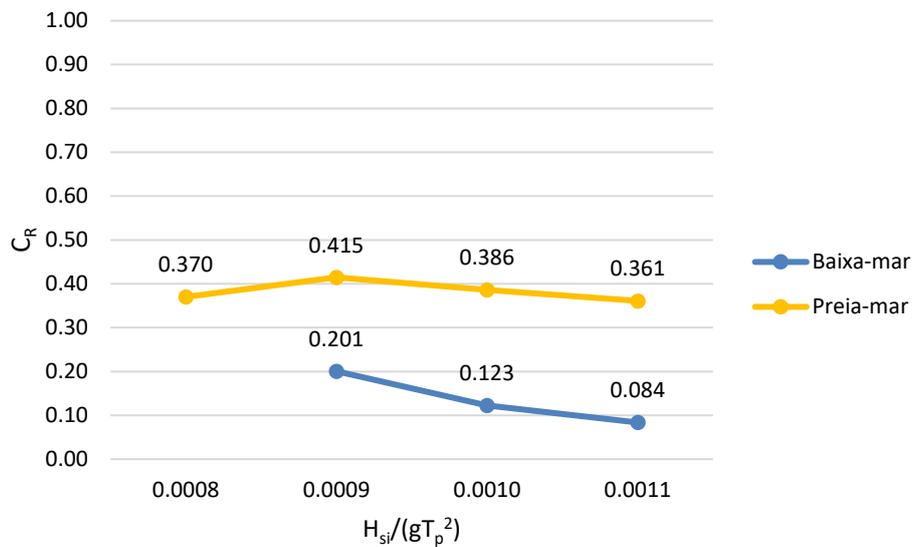


Fig. 4.14 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para a praia desprotegida.

Como se observa na Fig. 4.13, para o mesmo nível de maré, o aumento da altura das ondas geradas e correspondentemente do período de pico (Quadro 4.3), resulta num aumento do coeficiente de reflexão, ou seja, a capacidade da praia dissipar a energia das ondas incidentes vai diminuindo para as ondas com alturas e períodos de onda maiores. A subida do nível de maré provoca, também, um grande crescimento deste coeficiente.

Pode-se reparar, ainda, que a evolução do coeficiente é mais acentuada para o nível de maré mais baixo, sendo mais suave no nível de maré mais elevado. Este facto pode significar que para níveis de maré mais elevados, a influência da alteração da altura e período de onda é menor do que para os níveis menos elevados, uma vez que ocorre uma melhoria da eficiência hidráulica da estrutura dissipadora relativamente à reflexão. A partir de um determinado valor quando a altura de onda aumenta, verifica-se uma diminuição do C_R , como acontece para a maior altura significativa incidente testada, H_{si} , de 0.13 m.

A segunda série de ensaios corresponde ao início dos testes com a praia protegida pelos modelos do *SWED-Block*, sendo que o modelo liso foi o primeiro a ser alvo de análise. Com este bloco pretendia-se obter dados relativos à influência que a presença de uma estrutura artificial de proteção costeira tinha na propagação natural da agitação marítima e como é que isso influenciava a evolução do coeficiente de reflexão. Para além do que acontecia no cenário da praia desprotegida, em que o que influenciava a agitação marítima eram as alterações do nível de maré, o aumento da altura das ondas incidentes e pelo respetivo aumento do período de pico, nesta série de ensaios existiu um fator extra a condicionar a propagação das ondas. Isto, porque a estrutura do modelo liso do *SWED-Block*, constituía um elemento adicional de dissipação da energia das ondas incidentes a juntar à própria praia, também ela um elemento com características dissipativas.

Na Fig. 4.15, apresenta-se o gráfico comparativo da variação do coeficiente de reflexão para o nível de baixa-mar, (com uma profundidade de água igual a 0.33 m) e para o nível de preia-mar, (com uma profundidade de água igual a 0.60 m), para a praia protegida pelo modelo liso do bloco, através de dois módulos de 0.40 m de comprimento. Na Fig. 4.16 é apresentada a variação do C_R , em função do parâmetro adimensional anteriormente definido.

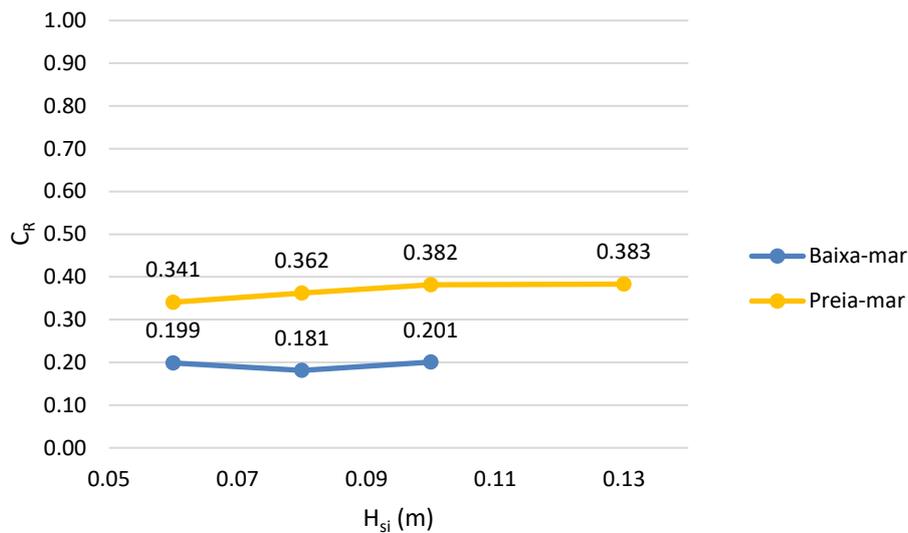


Fig. 4.15 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda para a praia protegida com o modelo liso do *SWED-Block* (valores em modelo).

Através da análise do gráfico presente na Fig. 4.15, verifica-se, novamente, que a subida do nível de maré faz aumentar o valor do coeficiente de reflexão. No entanto, o principal aspeto a registar é que a presença do bloco provoca um aumento do coeficiente de reflexão para as alturas de onda significativas menos elevadas no nível de baixa-mar, mantendo-se depois os valores praticamente constantes nas duas últimas alturas de onda estudadas. Contudo, nestes ensaios de baixa-mar a eficiência do bloco, para este nível, pode ter sido afetada pelo facto dos blocos não estarem confinados à largura do canal como se pretendia, tendo saído da sua posição inicial no decorrer dos testes. Nos ensaios seguintes os blocos foram confinados aos 0.82 m de largura efetiva do canal, através de um material compressível que, apesar de permitir assentamento e rotação dos blocos no decorrer dos ensaios, evitou a saída destes da posição inicial.

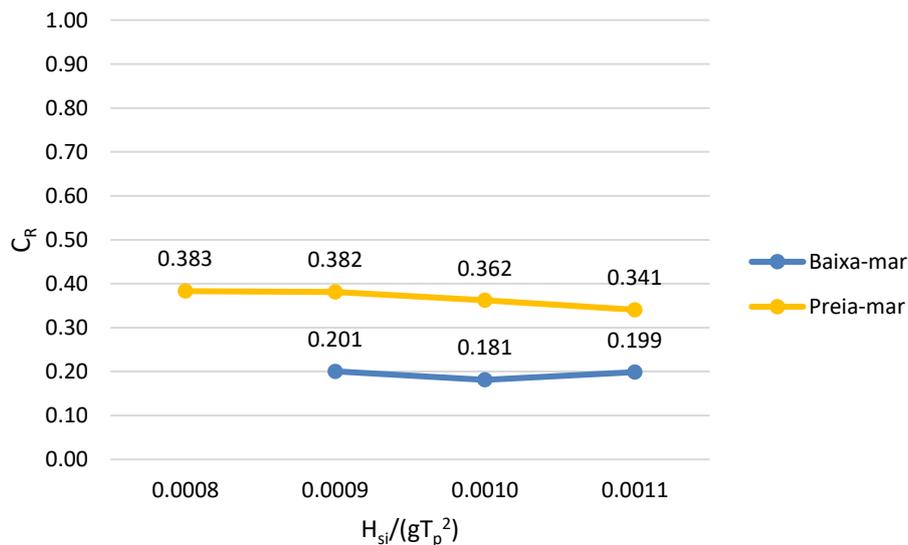


Fig. 4.16 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo liso.

Ao nível da preia-mar, os resultados mantêm-se próximos dos valores registados para o cenário da praia desprotegida. Destes dois aspetos pode-se concluir que a presença do bloco tem uma influência determinante na propagação das ondas incidentes e na sua reflexão para o nível menos elevado, enquanto que para o nível mais elevado, a presença do bloco é pouco significativa.

A influência das restantes variáveis como a altura de onda e o período de pico, continuam a ter bastante influência na evolução do coeficiente de reflexão para o nível de preia-mar, sendo a influência do bloco pequena. Pelo contrário, no nível de baixa-mar a presença do bloco é o principal fator a condicionar a evolução do coeficiente de reflexão, já que o aumento da altura de onda significativa parece não ter grande influência uma vez que o valor do coeficiente permanece praticamente inalterado. Pode-se concluir, então, que a eficiência hidráulica do modelo liso do *SWED-Block* é maior para as alturas de onda mais elevadas no nível de baixa-mar, sendo pouco eficiente para o nível de preia-mar.

Após esta série de ensaios, seguiram-se os testes com o modelo rugoso do *SWED-Block*. Com esta variante da solução anteriormente testada, pretendeu-se analisar a influência da introdução de um novo parâmetro bastante relevante na dissipação da energia das ondas, a rugosidade. Com introdução de um bloco com o paramento de barlar rugoso pretendia-se que este elemento tornasse mais eficiente a capacidade da estrutura em dissipar a energia das ondas incidentes. Este foi, portanto, um fator adicional a influenciar a propagação da agitação marítima, a juntar aos anteriormente referidos: o aumento da altura de onda significativa, que corresponde também a um aumento do período de pico, e a introdução do bloco dissipador.

Na Fig. 4.17, apresenta-se o gráfico comparativo da variação do coeficiente de reflexão para os níveis de baixa-mar e preia-mar, para a praia protegida pelo modelo rugoso do *SWED-Block*.

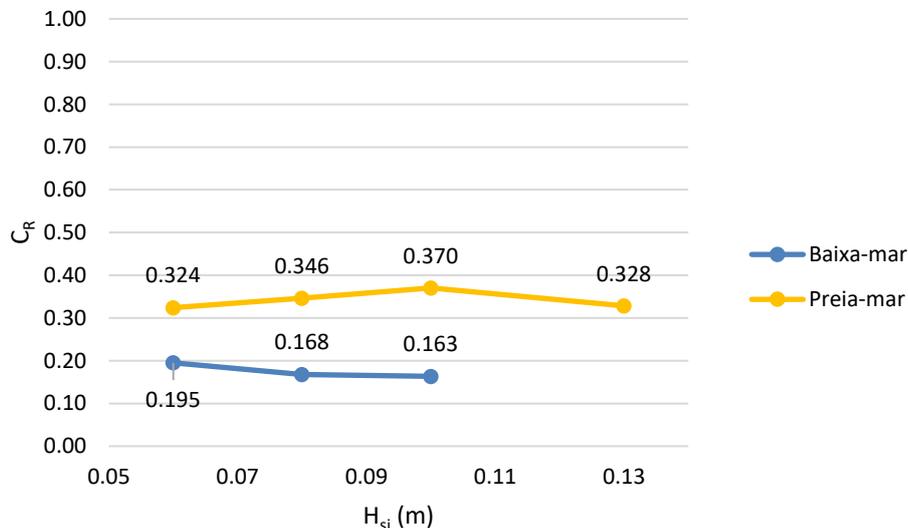


Fig. 4.17 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo rugoso do *SWED-Block* (valores em modelo).

A partir da leitura do gráfico da Fig. 4.17, verifica-se, mais uma vez, que o valor do coeficiente de reflexão aumenta com o aumento do nível de maré. No entanto, mais relevante do que esse aspeto, é o facto de pela primeira vez se registar uma inversão da tendência de subida deste coeficiente com o aumento da altura de onda significativa para o nível de baixa-mar. Para o nível de maré menos elevado, registou-se uma tendência de descida entre o primeiro e o segundo

período em estudo, a que se seguiu a estabilização do valor do coeficiente de reflexão, uma vez que a descida deste parâmetro quando a altura de onda aumento foi bastante residual. O que se pode concluir deste aspeto é que o modelo rugoso do *SWED-Block* apresenta um bom comportamento na redução da reflexão à medida que a altura de onda aumenta, para o nível maré de baixa-mar. No entanto ao fim de algum tempo essa eficiência tende a estabilizar para as alturas de onda testadas, sendo a redução do coeficiente cada vez menos significativa.

Na Fig. 4.18 é apresentada a variação do C_R em função do parâmetro adimensional.

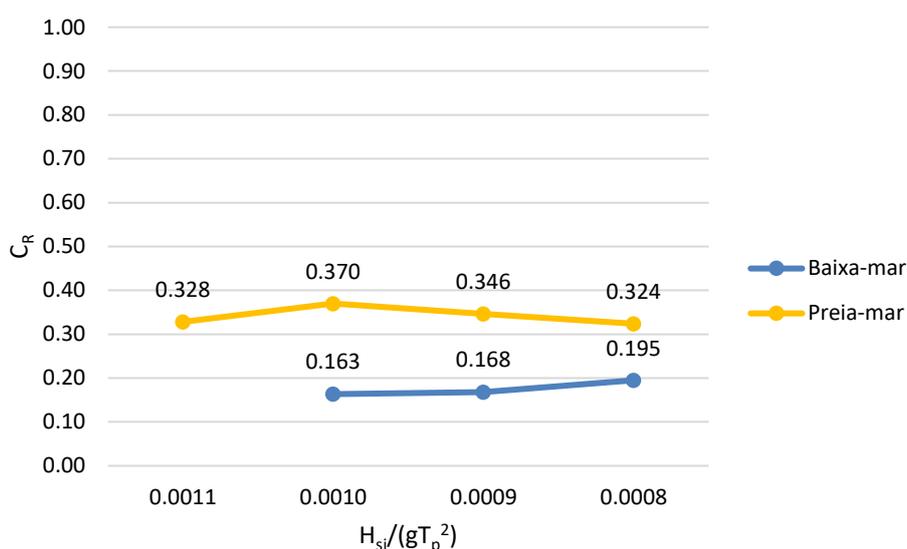


Fig. 4.18 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo rugoso do *SWED-Block*.

Para o nível de preia-mar, a situação que se regista é bastante semelhante ao que acontecia nos cenários anteriores, ou seja, os valores do coeficiente de reflexão vão aumentando com o aumento da altura de onda significativa e consequente alteração do seu período de pico, até que para a altura de onda mais elevada se regista uma inversão dessa tendência. Esta alteração de tendência pode significar que para este nível de maré, o modelo rugoso do bloco é mais eficiente para ondas com alturas significativas mais elevadas. Ainda assim, a conclusão obtida para o modelo liso, é válida também para este modelo: a presença dos blocos tem uma maior influência na redução da reflexão, para o nível de baixa-mar do que para o nível de preia-mar.

O terceiro modelo do *SWED-Block*, alvo de ensaios em laboratório, foi o modelo poroso. Este bloco, ao contrário do anterior, não é exatamente uma variante do modelo liso, mas antes um novo modelo de bloco. De facto, este novo modelo comporta dois novos parâmetros que têm um grande impacto na dissipação da energia das ondas, que são a porosidade e a permeabilidade. Para além disso, o bloco possui um paramento de sotamar vertical, aspeto que se deve também ter em consideração na análise da reflexão.

Com a introdução da porosidade e da permeabilidade na configuração do bloco, esperava-se conseguir uma maior dissipação da energia das ondas. Na Fig. 4.19 apresenta-se o gráfico comparativo do comportamento do modelo poroso na evolução do coeficiente de reflexão, para os níveis de baixa-mar e preia-mar.

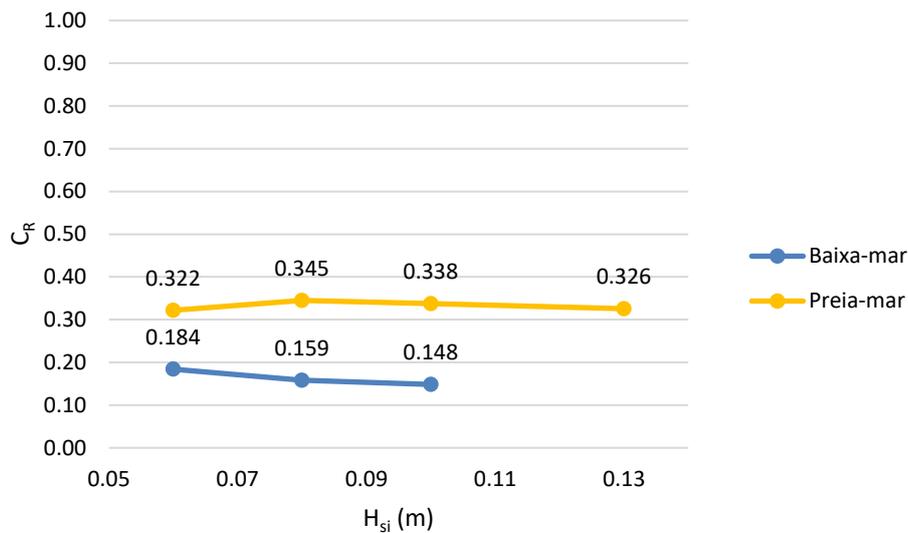


Fig. 4.19 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo poroso do *SWED-Block* (valores em modelo).

Para o nível da baixa-mar assiste-se a uma tendência de descida do valor do coeficiente de reflexão, à medida que os valores do período de pico e, conseqüentemente, da altura de onda significativa vão aumentando. Isto significa que o bloco é mais eficiente na dissipação da energia da onda incidente e refletida para as ondas com alturas significativas mais elevadas. Em relação ao nível de preia-mar, apesar de entre os dois primeiros períodos o coeficiente de reflexão aumentar, este inverte a tendência com duas diminuições consecutivas nas restantes alturas de onda testadas. O aumento do nível da maré continua a ter um papel importante na subida do valor da reflexão, contudo, neste modelo do bloco essa subida atinge valores menores do que nas soluções lisa e rugosa. A análise comparativa entre os diversos modelos será feita mais adiante neste documento.

De referir ainda que os blocos continuam a ser mais eficientes para os níveis de maré menos elevados, contudo, a eficiência hidráulica destes para os níveis de maré mais elevados aumentou, como se verifica pela inversão da tendência de evolução do coeficiente de reflexão logo na segunda altura de onda testada.

Na Fig. 4.20 é apresentada a variação do C_R em função do parâmetro adimensional.

A quarta série de ensaios de laboratório realizou-se novamente com os modelos lisos do *SWED-Block*, utilizando agora três módulos em vez dos dois usados nos ensaios anteriores. A utilização de três blocos teve como objetivo analisar a influência possível ocorrência de erosões localizadas ao longo da largura do canal de ensaios na estabilidade da estrutura, mas também avaliar o comportamento de módulos mais pequenos quando expostos à agitação marítima desfavorável. Para essa análise foram utilizados dois blocos com um comprimento de 0.20 m e um outro com um comprimento de 0.40 m.

Nestes ensaios as características dos blocos são semelhantes às do modelo liso e rugoso, uma vez que esta estrutura é também impermeável. Apesar do paramento de barlar voltar não a incorporar elementos capazes de conferir um grau de rugosidade ou de porosidade ao bloco, existia a expectativa de que os resultados fossem diferentes dos obtidos para o modelo liso, por via de um comportamento diferente dos blocos.

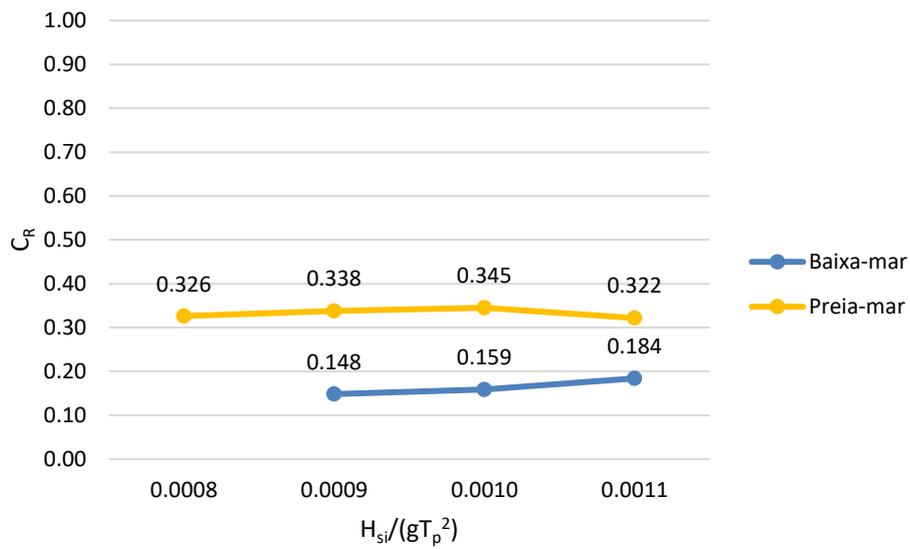


Fig. 4.20 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo poroso.

Na Fig. 4.21 é apresentado gráfico comparativo da evolução do coeficiente de reflexão para os níveis de baixa-mar e de preia-mar, para a praia protegida pelo modelo liso do *SWED-Block*, com duas dimensões distintas.

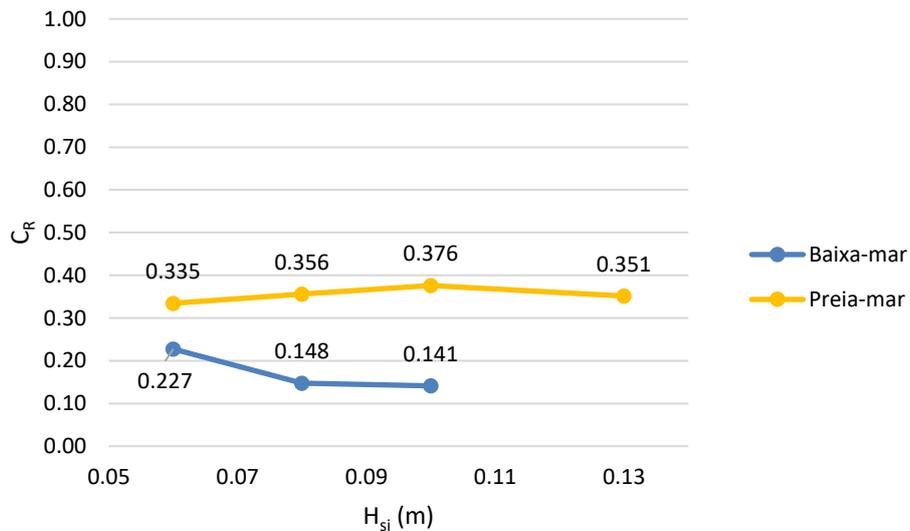


Fig. 4.21 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura de onda significativa para a praia protegida com o modelo liso de 0.20 m do *SWED-Block* (valores em modelo).

Analisando a Fig. 4.21 verifica-se, novamente, a relevância que o nível de maré tem no valor da energia refletida. Para o nível de baixa-mar, o comportamento dos blocos com 0.20 m de comprimento, foi diferente do que aconteceu nos ensaios só com blocos de 0.40 m, uma vez que este ensaio já se realizou com as estruturas confinadas à largura do canal. Para este nível de maré, a eficiência do bloco a dissipar a energia das ondas aumentou entre a primeira e a segunda alturas de onda significativas estudadas, tendo praticamente estabilizado entre a segunda e a terceira altura, o que pode significar que se atingiu o limite de eficiência para estas condições de agitação.

Relativamente ao nível de preia-mar, os valores do coeficiente de reflexão tendem a subir nos três primeiros ensaios, invertendo a tendência ascendente para a quarta altura de onda analisada.

Podemos, então, concluir que para este modelo do bloco a eficiência na dissipação da energia das ondas incidentes para o nível de água de preia-mar, é maior em situações com alturas de onda significativa maiores, sendo pouco significativa quando se verificam alturas de onda mais pequenas. Na Fig. 4.22 é apresentada a variação do C_R em função do parâmetro adimensional.

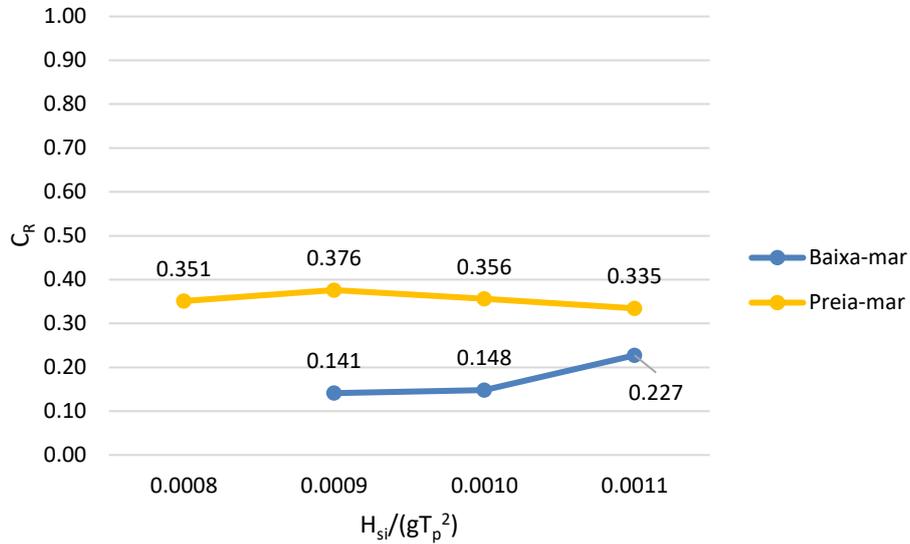


Fig. 4.22 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o modelo liso de 0.20 m.

4.4.2.2. Variação do coeficiente de reflexão para os diferentes modelos do bloco.

Neste capítulo será feita a comparação da variação do coeficiente de reflexão para os diferentes modelos do *SWED-Block*, quando exposto às mesmas condições de agitação marítima e aos mesmo níveis de maré.

Na Fig. 4.23, é apresentada a variação do valor do coeficiente de reflexão para o nível de baixa-mar, provocada pelo o aumento da altura de onda significativa e do aumento do período da onda de pico, para todos os ensaios laboratoriais realizados.

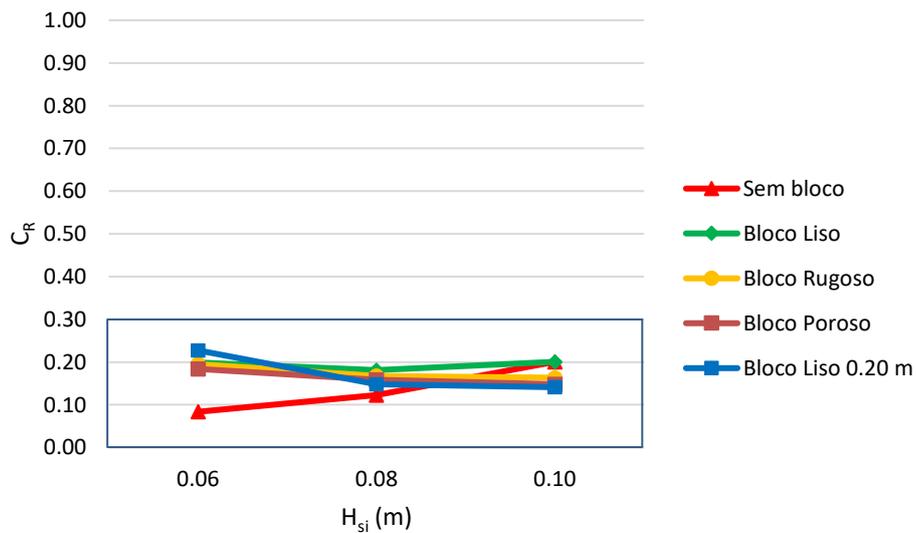


Fig. 4.23 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de BM (valores em modelo).

Para uma melhor visualização e compreensão dos valores de reflexão obtidos para cada uma das configurações testadas, apresenta-se na Fig. 4.24 um intervalo mais curto do gráfico da Fig. 4.23.

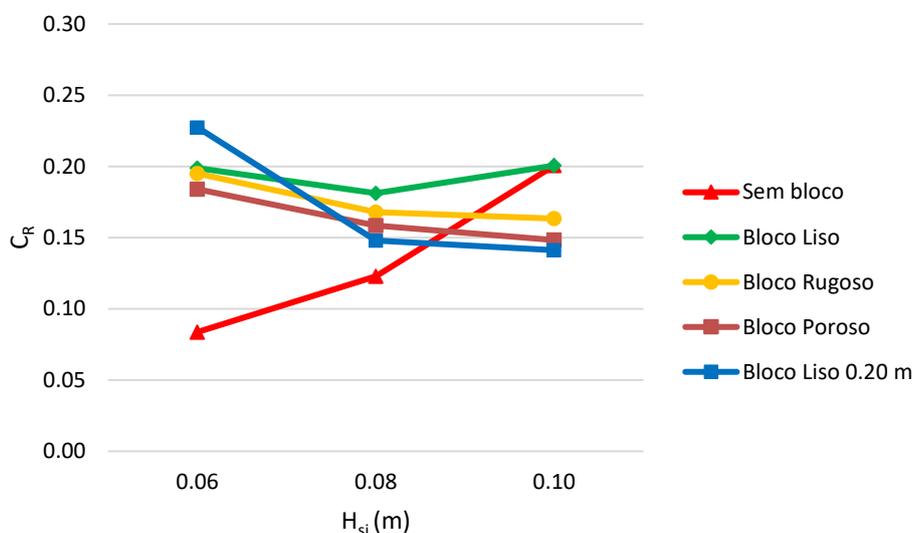


Fig. 4.24 - Variação do coeficiente de reflexão, com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de BM (valores em modelo).

As figuras anteriores permitem perceber que a presença do bloco provoca um aumento do coeficiente de reflexão. Esta situação era expectável tendo em conta que apesar de se tratar de uma estrutura cujo principal objetivo é a dissipação da energia das ondas incidentes, esta reflete também parte da energia incidente para o largo, facto que pode ser explicado pela falta de capacidade em absorver ou dissipar a totalidade da energia incidente, situação que na realidade é algo impossível de acontecer.

Contudo, é também verdade que apesar do coeficiente de reflexão ter um valor maior para as menores alturas de onda, nomeadamente para 0.06 e 0.08 m, na presença dos blocos este coeficiente apresenta uma trajetória descendente, ao contrário do que sucede na situação da praia desprotegida, em que se verifica uma tendência de subida. Com exceção do que acontece com o modelo liso, pelas razões apresentadas anteriormente, para a altura de onda significativa mais elevada o valor do coeficiente de reflexão já é menor quando a praia se encontra protegida pelos blocos comparativamente com a situação em que a praia estava desprotegida e exposta às condições de agitação marítima. Mais uma vez se confirma que a eficiência dos blocos relativamente à diminuição da reflexão vai sendo progressivamente maior para as alturas de onda mais elevadas, tendendo a estabilizar quando se atinge o limite da capacidade da estrutura.

De referir ainda que apesar das condições de ensaio, para o modelo liso, não terem sido as mesmas pelo facto das estruturas deste modelo não se encontrarem confinadas no canal, tendo saído da sua posição inicial, para as alturas de onda menos desfavoráveis a tendência de descida também se verifica, tal como nos restantes modelos. Para a altura de onda mais elevada, em que as condições de agitação são mais desfavoráveis, verifica-se um aumento do coeficiente de reflexão, que pode ser explicado pelo deslocamento dos blocos da sua posição inicial e a conseqüente perda de eficiência dos mesmos. Na Fig. 4.25 é apresentada a variação do C_R , em função do parâmetro adimensional.

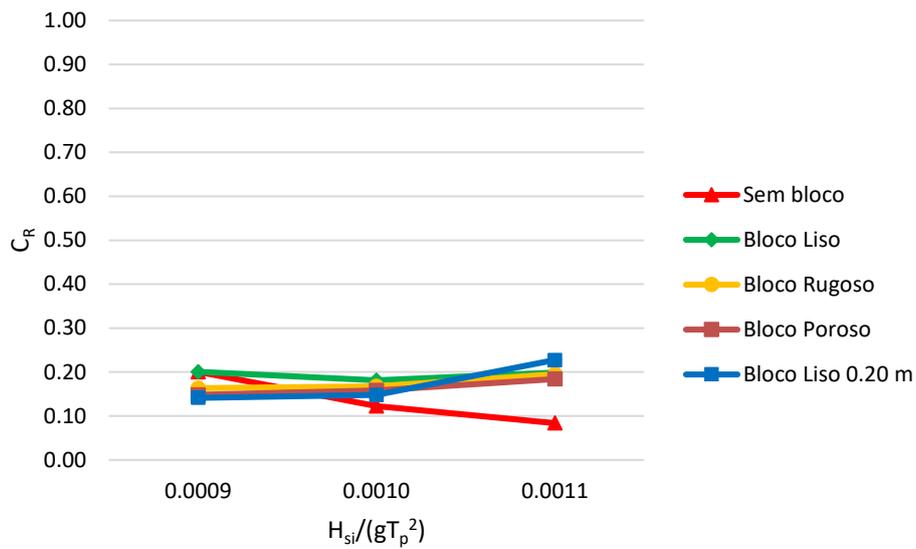


Fig. 4.25 - Variação do coeficiente de reflexão, em função do parâmetro adimensional, para o nível de maré de BM.

Na Fig. 4.26 é apresentada a variação do coeficiente de reflexão para o nível de preia-mar, com o aumento do período da onda de pico e altura de onda significativa, para todos os ensaios realizados. Apresenta-se de seguida na Fig. 4.27 uma ampliação do gráfico da Fig. 4.26, para uma melhor visualização e compreensão dos resultados obtidos.

Para o nível de preia-mar, pode-se observar que a diferença dos valores da energia refletida sem a presença do bloco e com a presença deste, já não é tão significativa como para o nível de maré de baixa-mar. Verifica-se logo para as primeiras alturas de onda significativa testadas, que qualquer que seja o modelo utilizado, os valores do coeficiente de reflexão são mais baixos do que aconteceria caso os blocos não estivessem na praia.

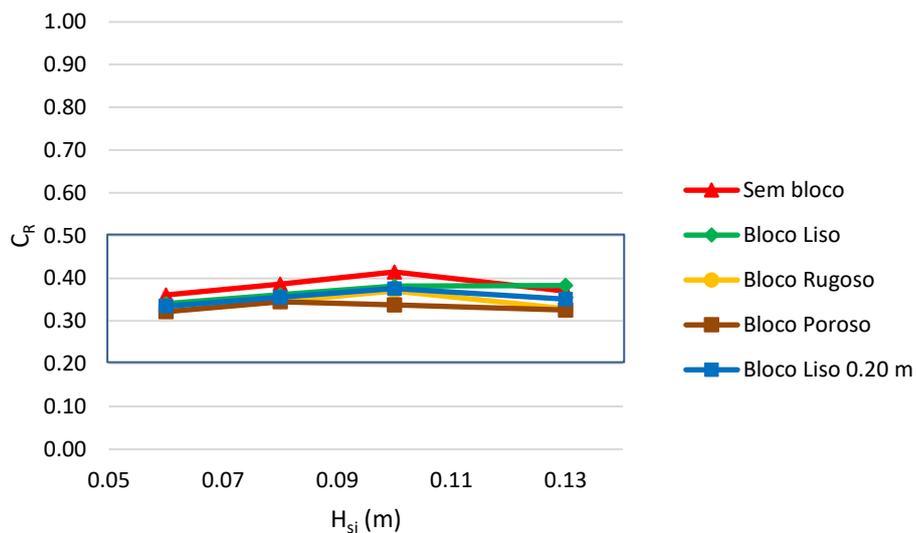


Fig. 4.26 - Variação do C_R , com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de PM (valores em modelo).

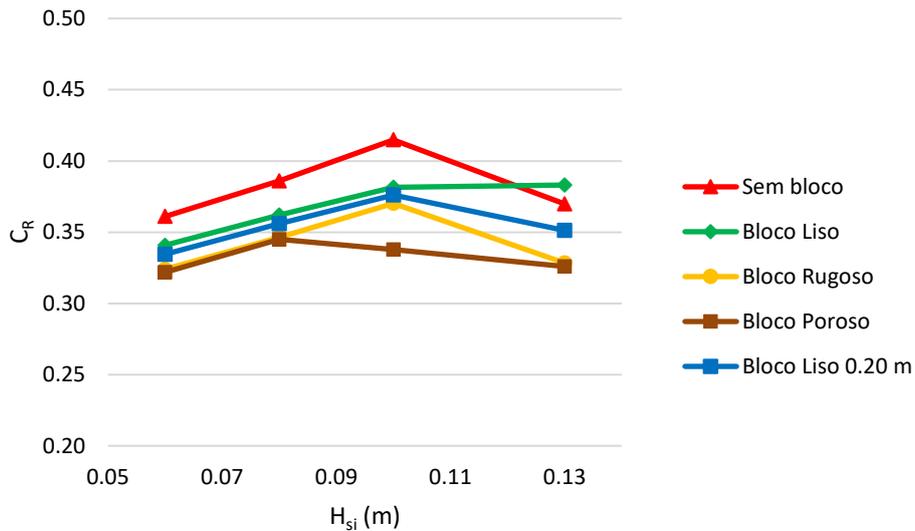


Fig. 4.27 - Variação do C_R , com o aumento da altura significativa de onda, para o nível de maré de PM (valores em modelo).

Até à segunda altura de onda analisada os resultados obtidos para as quatro configurações de blocos são bastante semelhantes, sendo que para a terceira altura de onda se verifica uma melhoria na eficiência do modelo poroso, assistindo-se a uma diminuição do coeficiente de reflexão que continua na quarta altura de onda. O modelo rugoso também melhora o seu comportamento na quarta altura de onda, atingido valores próximos dos obtidos pelo modelo poroso, o que revela que este modelo pode ser igualmente eficaz, mas para condições em que as alturas de onda são mais elevadas do que acontece com o poroso. O modelo liso tem um comportamento misto, na configuração com dois blocos de 0.40 m verificou-se uma ligeira subida do coeficiente de reflexão, sendo esta superior à situação em que a praia estava desprotegida, embora esta subida seja inferior ao que aconteceu para as alturas de onda analisadas imediatamente antes. Pelo contrário, os blocos do modelo liso com uma configuração de 0.20 m, apresentam uma melhoria para a quarta altura de onda, ainda assim os valores são superiores aos registados para os modelos rugoso e poroso.

Na Fig. 4.28 é apresentada a variação do C_R , em função do parâmetro adimensional.

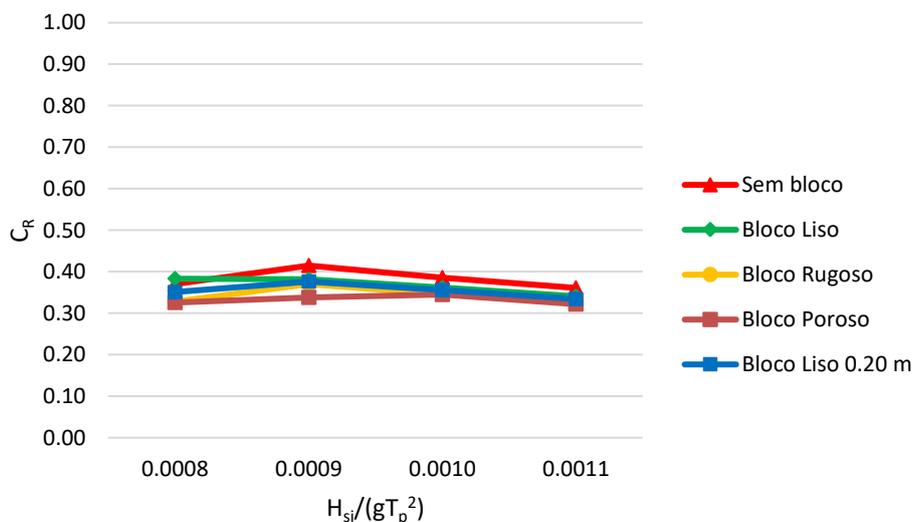


Fig. 4.28 - Variação do C_R , em função do parâmetro adimensional, para o nível de maré de PM.

No Quadro 4.5 e no Quadro 4.6 apresenta-se o resumo dos valores dos coeficientes de reflexão obtidos nos ensaios realizados no laboratório, para os níveis de baixa-mar e de preia-mar, que se apresentaram nos gráficos das figuras anteriores. A verde destaca-se o C_R mais baixo para cada uma das H_{si} estudadas.

Quadro 4.5 - Coeficientes de reflexão registados para o nível de Baixa-Mar.

Modelo	Nível de Água (m)	Coeficiente de Reflexão, C_R		
		$H_{si} = 0.06$ m	$H_{si} = 0.08$ m	$H_{si} = 0.10$ m
Sem Bloco	0.33 (Baixa-Mar)	0.084	0.123	0.201
Liso		0.199	0.181	0.201
Rugoso		0.195	0.168	0.163
Poroso		0.184	0.159	0.148
Liso 0.20m		0.227	0.148	0.141

Quadro 4.6 - Coeficientes de reflexão registados para o nível de Preia-Mar.

Modelo	Nível de Água (m)	Coeficiente de Reflexão, C_R			
		$H_{si} = 0.06$ m	$H_{si} = 0.08$ m	$H_{si} = 0.10$ m	$H_{si} = 0.13$ m
Sem Bloco	0.60 (Preia-Mar)	0.361	0.386	0.415	0.370
Liso		0.341	0.362	0.382	0.383
Rugoso		0.324	0.346	0.370	0.328
Poroso		0.322	0.345	0.338	0.326
Liso 0.20m		0.335	0.356	0.376	0.351

Analisando as Fig. 4.23 e Fig. 4.26, e os Quadro 4.5 e Quadro 4.6, é possível perceber qual dos modelos do *SWED-Block* apresentou um melhor comportamento do ponto de vista hidráulico, através de uma maior eficiência na redução da energia de onda refletida.

O modelo poroso foi como se esperava aquele que apresentou melhores resultados, conseguindo apresentar o valor do coeficiente de reflexão mais baixo em cinco dos sete ensaios realizados, sendo que em quatro desses ensaios este modelo registou os valores mais baixos do coeficiente de reflexão correspondente ao nível de preia-mar, o nível em que as condições de agitação são mais desfavoráveis à atuação dos blocos. O facto de se tratar de um modelo poroso e permeável já fazia prever que fosse esta a solução a originar os melhores resultados. Estas propriedades têm um papel relevante no processo de dissipação da energia das ondas a desempenhar por estruturas de proteção costeira como esta, uma vez que a dissipação da energia de onda ocorre também no interior do meio poroso, devido à turbulência gerada no escoamento.

O modelo que apresentou os segundos melhores resultados foi o rugoso, isto é, apresentou os segundos valores de coeficiente de reflexão mais baixos para todas as alturas de onda significativas analisadas em preia-mar e numa de baixa-mar. Tal como a porosidade e a permeabilidade, a rugosidade é também um fator relevante na dissipação da energia das ondas.

O modelo liso foi o que apresentou piores resultados, de realçar que se registaram resultados diferentes para os ensaios realizados com blocos de 0.40 m e para os ensaios com blocos de 0.20 m. Para o nível de preia-mar os resultados obtidos para as três primeiras alturas de onda significativas são bastantes semelhantes, divergindo apenas na última com o valor de 0.13 m. Nos ensaios com blocos de 0.20 m, verificou-se uma diminuição do valor da reflexão enquanto que nos ensaios com blocos de 0.40 m este valor continuou a aumentar.

Já para o nível de baixa-mar, os ensaios realizados com blocos de 0.20 m são os que apresentam melhores resultados em duas das alturas de onda significativas estudadas, ficando à frente de todos os outros modelos para as alturas de 0.08 e 0.10 m, ainda assim com valores bastante próximos dos obtidos pelo modelo poroso.

O modelo liso na configuração com dois blocos com 0.40 m de comprimento, é a solução que na globalidade dos ensaios efetuados apresenta os piores resultados na função de dissipação da energia da onda. Para os dois níveis de maré estudados, este modelo apresenta para a altura de onda significativa mais elevada, ou seja, 0.10 m em baixa-mar e 0.13 m em preia-mar, um valor coeficiente de reflexão igual ou superior aos valores que se registaram na praia desprotegida, como se verifica nas tabelas e nos gráficos apresentados.

Num trabalho experimental da natureza do que se realizou no âmbito desta dissertação, é muito difícil obter sempre os valores de altura de onda significativa pretendidos, pois existem variáveis que se vão alterando ao longo dos ensaios. Quer por limitações do gerador, quer por pequenos fatores, o valor que se obtém varia de ensaio para ensaio, mesmo que a altura de onda e o período pretendidos sejam os mesmos. Um dos fatores que pode ditar a ocorrência destas variações é o nível da água em cada ensaio, uma vez que este nível vai variando ao longo do dia por evaporação da água, ou até por erros associados à leitura do nível da água no tanque.

No Quadro 4.7, apresentam-se as alturas de ondas significativas incidentes, H_{si} , e refletidas, H_{sr} , registadas pelas sondas de níveis hidrodinâmicos e que serviram para fazer a análise de reflexão que se apresentou ao longo desta secção do documento. Neste quadro é possível verificar a variação dos valores obtidos para a H_{si} e H_{sr} em cada um dos ensaios efetuados.

Quadro 4.7 - Alturas de onda significativas geradas nos ensaios.

Modelo	Profundidade de Água (m)	Período (s)	H _{si} , pretendida (m)	H _{si} , gerada (m)	H _{sr} , (m)
Sem Bloco	0.33 (Baixa-Mar)	2.32	0.06	0.0664	0.0056
Liso				0.0646	0.0129
Rugoso				0.0651	0.0127
Poroso				0.0649	0.0119
Liso 0.20m	0.60 (Preia-Mar)	2.32	0.06	0.0660	0.0150
Sem Bloco				0.0567	0.0207
Liso				0.0594	0.0202
Rugoso				0.0591	0.0192
Poroso	0.0595	0.0191			
Liso 0.20m	0.33 (Baixa-Mar)	2.84	0.08	0.0584	0.0196
Sem Bloco				0.0854	0.0105
Liso				0.0823	0.0149
Rugoso				0.0835	0.0140
Poroso	0.0809	0.0128			
Liso 0.20m	0.60 (Preia-Mar)	2.84	0.08	0.0849	0.0126
Sem Bloco				0.0808	0.0312
Liso				0.0789	0.0286
Rugoso				0.0778	0.0270
Poroso	0.0782	0.0270			
Liso 0.20m	0.33 (Baixa-Mar)	3.36	0.10	0.0787	0.0280
Sem Bloco				0.0957	0.0192
Liso				0.0956	0.0192
Rugoso				0.0968	0.0158
Poroso	0.0953	0.0141			
Liso 0.20m	0.60 (Preia-Mar)	3.36	0.10	0.0965	0.0136
Sem Bloco				0.1034	0.0429
Liso				0.1010	0.0384
Rugoso				0.1020	0.0377
Poroso	0.0991	0.0335			
Liso 0.20m	0.60 (Preia-Mar)	4.13	0.13	0.1019	0.0383
Sem Bloco				0.1297	0.0480
Liso				0.1300	0.0490
Rugoso				0.1320	0.0433
Poroso	0.1272	0.0414			
Liso 0.20m				0.1291	0.0453

4.4.3. ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES DO PERFIL TRANSVERSAL DA PRAIA

No trabalho experimental com o objetivo de avaliar a eficiência hidráulica do bloco nos processos de erosão ou acreção que ocorreram durante os ensaios, foi utilizado um perfilador 2D, cujo funcionamento já foi descrito anteriormente. Também se mencionou que o perfilador efetuou as medições sempre numa extensão da praia a sotamar do bloco (Fig. 4.12). No restante comprimento da praia em redor e a barlar do bloco, a medição foi feita com recurso a fotografias e vídeos, por ser uma parte visível através da janela de observação do tanque de ondas.

A avaliação das alterações ao perfil transversal da praia foi realizada por comparação entre os perfis existentes antes e depois da agitação marítima atuar sobre esta e sobre os blocos. Para tal, os ensaios relativos a cada um dos níveis de maré começaram sempre com o perfil liso, tendo o talude as inclinações já mencionadas. Antes do início dos ensaios foi realizada uma medição do perfil inicial da praia e após a conclusão de cada um dos ensaios, para um dado nível de maré, era novamente, efetuada uma leitura do perfil da praia resultante da ação das ondas.

A metodologia de medição dos perfis foi a mesma que se utilizou para a análise de reflexão, uma vez que o objetivo era avaliar qual a influência da presença do bloco na praia e comparar com o que acontecia no cenário em que a praia estava desprotegida. Pretendia-se, também, comparar os resultados obtidos para os diferentes modelos do *SWED-Block* de forma a averiguar qual era o mais eficiente na mitigação dos problemas de erosão.

4.4.3.1. Cenário de Praia Desprotegida

Os dois primeiros perfis medidos correspondem, naturalmente, aos ensaios relativos à situação em que a praia estava desprotegida, ou seja, quando nenhum dos modelos do bloco de proteção costeira estava a ser testado, estando a praia exposta à agitação marítima. Na Fig. 4.29 apresenta-se o gráfico da situação antes e depois da atuação das ondas sobre a praia, para o nível de baixamar, que corresponde a uma profundidade de água de 0.33 m.

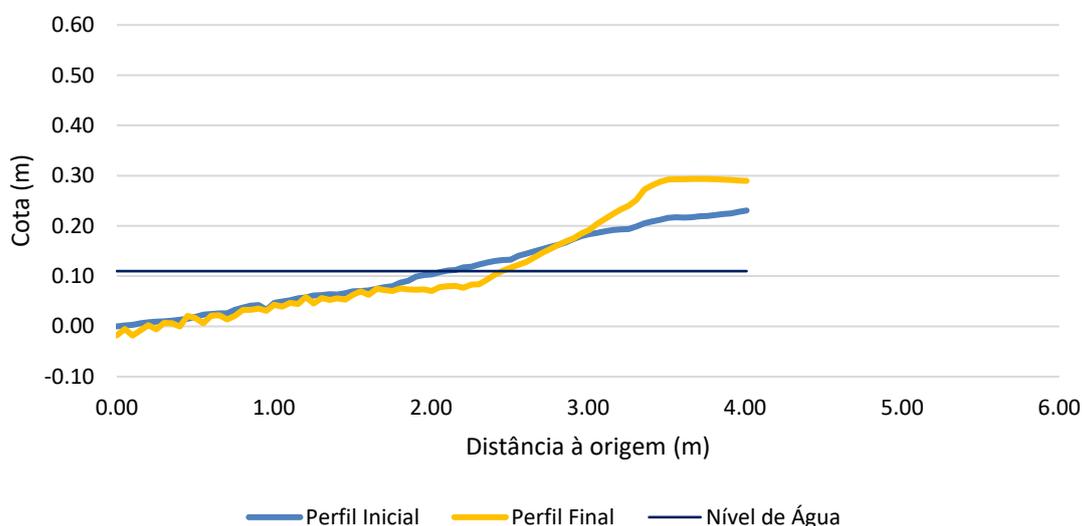


Fig. 4.29 - Perfil transversal da praia desprotegida, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.

Para este nível de maré, pela observação dos perfis presentes na figura anterior, verifica-se uma ligeira erosão da praia ao longo dos dois metros iniciais, sendo depois essa erosão maior na zona de rebentação, que, para este nível de maré se situava aproximadamente a uma distância entre os 1.80 e os 3.0 m, relativamente ao início do perfil.

Na zona final da praia, que corresponde à zona de espraçamento para este nível de maré, pode-se observar a ocorrência de um processo de acreção, através do aumento do volume de areia neste local. Ao contrário do que sucede com os restantes perfis recolhidos, neste só se registaram os primeiros 4.0 m de extensão do perfil e não os 6.0 m que se referiu anteriormente, uma vez que para este nível de maré só se percebeu que o espraçamento iria provocar tantas alterações no perfil da praia, nesta zona, após a realização dos primeiros ensaios. Nos ensaios seguintes, o perfil transversal da praia já foi medido numa extensão de 6.0 m em ambos os níveis de maré.

O que se pode concluir da realização destes ensaios, é que para este nível de maré, as condições de agitação geradas são favoráveis à mitigação dos efeitos erosivos na praia e na zona dunar, pois o movimento de sedimentos processa-se em direção à praia, sendo estes transportados pelas ondas desde a zona de rebentação até à zona de espraçamento.

As alterações do perfil ocorridas na zona onde se colocaram os blocos nos ensaios com a praia protegida, são visíveis pela janela de observação e estão presentes na Fig. 4.30 que se apresenta de seguida.



Fig. 4.30 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.

Através da fita colada no vidro que foi utilizada para ajudar a nivelar o perfil inicial da praia (a castanho na imagem) é possível comparar os perfis antes e depois da realização dos ensaios para o nível de maré de baixa-mar. Percebe-se facilmente que ocorreu um processo erosivo nesta zona da praia, que se prolonga até aos primeiros 3.0 m medidos pelo perfilador e que são ilustrados na Fig. 4.29. A linha amarela presente na Fig. 4.30, representa o local onde o perfilador iniciava as medições, sendo o ponto de origem dos gráficos dos perfis transversais. Os perfis que se apresentam neste trabalho correspondem à zona situada à esquerda da linha amarela presente em todas as imagens da janela de visualização.

Apesar da ocorrência de erosão nesta zona da praia, nem toda a areia se movimentou para a zona de espraçamento. Com efeito um pequeno volume destes sedimentos foi transporta para barlamar, pela ação das ondas refletidas pela estrutura dissipadora, que é a própria praia. No entanto, da análise das Fig. 4.29 e Fig. 4.30 pode-se afirmar que na globalidade estas condições de teste representam condições de agitação propícias ao processo de acreção na zona emersa da praia.

A segunda série de ensaios com a praia desprotegida realizou-se para um nível de água de 0.60 m, que correspondia ao nível de preia-mar. Na Fig. 4.31 apresenta-se o gráfico inicial e final do perfil transversal da praia. Algumas variações pontuais e não expectáveis na linha que representa o perfil transversal inicial devem-se a erros de medição do próprio perfilador, como acontece entre os 4.0 e os 5.0 m.

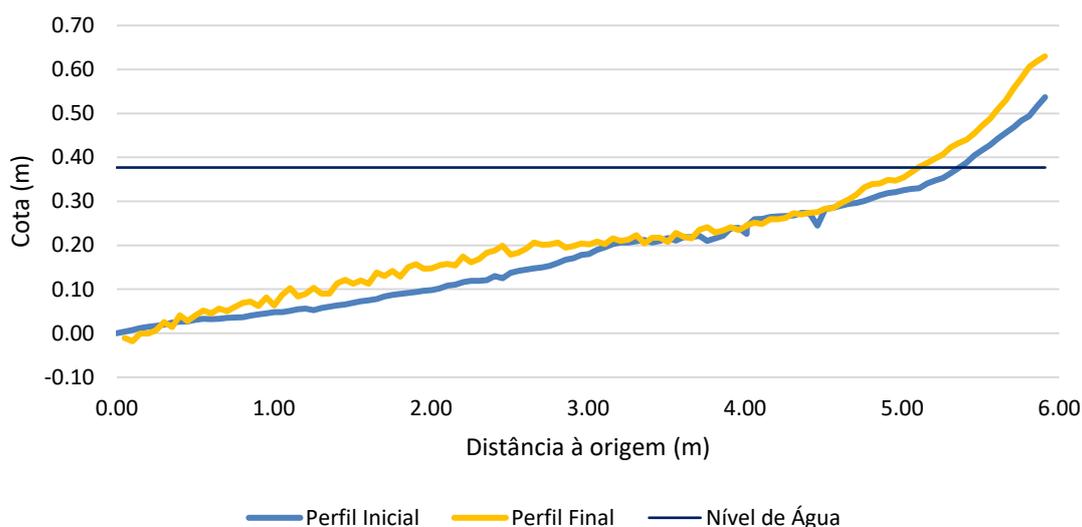


Fig. 4.31 - Perfil transversal da praia desprotegida antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.

Relativamente ao nível de preia-mar pode-se verificar através da análise da Fig. 4.31 que existiu uma movimentação de sedimentos de barlamar para sotamar, tendo existido acreção no perfil da praia na maior parte da extensão de praia medida através do perfilador. Apenas na zona imediatamente a sotamar do local onde serão colocados os blocos, que corresponde à zona situada no lado esquerdo da Fig. 4.32 que se apresenta a seguir, se registou a ocorrência de uma pequena situação de erosão.



Fig. 4.32 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.

Através da observação da Fig. 4.31 e da Fig. 4.32, é possível concluir que a erosão ocorreu na zona inicial da praia construída para os ensaios, que é o local onde começa a diminuir a profundidade de água. Na Fig. 4.32 e tendo como referência a fita castanha colada no vidro do tanque, e o desenho do bloco, é possível verificar a ocorrência de erosão também na zona onde se onde serão colocados os blocos nos ensaios com a praia protegida.

É provável que a quantidade de sedimentos arrastados do local visível na Fig. 4.32 seja a mesma que permitiu a existência do processo de acreção da praia a sotamar desta zona como se comprova na Fig. 4.31, em particular no sítio que antecede a zona de rebentação e a zona de espraiamento. Na zona onde ocorre a rebentação das ondas verifica-se uma ligeira situação de erosão, que se justifica pela forte movimentação de sedimentos que se gera através do impacto da onda no talude da praia ao rebentar.

Os sedimentos que se foram retirados deste local da praia por ação da rebentação da onda podem ter tido dois destinos diferentes: ou seja podem ter sido arrastados para dois locais: um correspondente à zona de espraiamento que se situa imediatamente após a zona de rebentação, o outro, para barlamar, por ação das ondas refletidas pela praia como se comprova na Fig. 4.31.

4.4.3.2. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Liso

Após a realização de ensaios com a praia exposta à agitação marítima, iniciou-se uma nova série de testes com um novo cenário para a praia, desta vez protegida através do modelo liso do *SWED-Block*. Com esta solução pretendia-se avaliar a influência do bloco na propagação das ondas incidentes, bem como a sua capacidade de prevenir situações de ocorrência de erosão da praia e de promover a retenção dos sedimentos arrastados pelas ondas refletidas em direção ao largo.

Na Fig. 4.33 e Fig. 4.34 apresenta-se o perfil transversal da praia na zona a sotamar do bloco e a fotografia da zona visível a partir da janela de observação do tanque de ondas, respetivamente.

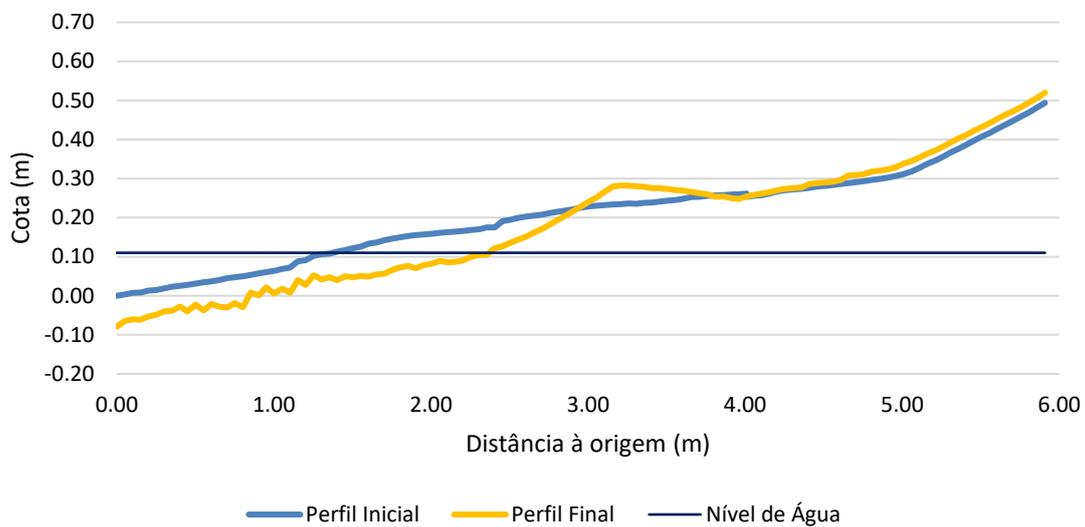


Fig. 4.33 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.



Fig. 4.34 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.

Analisando em conjunto as duas imagens anteriores é possível perceber a quantidade de areia em falta na extensão da praia que vai desde a zona imediatamente a sotamar do bloco até ao local onde ocorre o espraiamento da onda. No lado esquerdo da Fig. 4.34 e com auxílio da fita colada no vidro, é possível ver o início da extensão de praia que foi alvo de erosão, situação que continua aos longo dos primeiros 3.0 m medidos pelo perfilador. A barlar do bloco as alterações ao perfil da praia são mínimas, como se pode visualizar na mesma fotografia, havendo apenas as micro rugosidades normais de uma zona submersa.

Através da Fig. 4.33 é possível reparar que a areia em falta a sotamar do bloco, se movimentou para a zona de espraiamento onde ocorreu a formação de uma elevação do perfil da praia. Na zona de rebentação para este nível de água nota-se que se registou erosão, tendo os sedimentos sido também transportados para o banco de areia que se formou a sotamar deste local. Após o local onde ocorreu acreção, o perfil inicial e final da praia, são praticamente coincidentes, pois para este nível de maré a água as ondas não atingem este local da praia, não provocando alterações.

Na Fig. 4.35 e na Fig. 4.36 são apresentadas a posição inicial e a posição final da estrutura do modelo liso do *SWED-Block*, respetivamente.



Fig. 4.35 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.



Fig. 4.36 - Bloco na posição final, o desenho a preto no vidro representa a posição inicial.

Da observação das figuras anteriores é possível perceber qual foi o comportamento do bloco sob a ação das condições de agitação marítima testadas para este nível de maré. Nesta série de ensaios, como na série correspondente à preia-mar, os módulos do bloco não se encontravam confinados à largura do canal, podendo existir circulação de água e de sedimentos entre a estrutura e o vidro da janela ou entre esta e as placas divisórias. A circulação de sedimentos por esses espaços, começou por provocar o descalçamento da fundação dos blocos nas extremidades, progredindo depois para a zona central. O deslocamento dos sedimentos situados debaixo do bloco provocou o assentamento da estrutura em relação à posição inicial, seguida de rotação para sotamar, isto

porque para este nível de maré, as ondas maiores ou rebentavam antes de atingir os blocos ou precisamente sobre a estrutura.

Na Fig. 4.36 são visíveis os sinais da erosão, que provocaram o assentamento e rotação do bloco, que na sua posição inicial deveria ocupar o local representado pelo desenho a preto no vidro da janela de observação, acima da fita castanha colada no vidro.

Na Fig. 4.37 e Fig. 4.38 é possível visualizar uma outra consequência provocada pelo facto dos módulos da estrutura não estarem confinados à totalidade da largura do canal. Os blocos sofreram assentamento nas extremidades, devido à erosão sob a estrutura, e, conseqüentemente, a ligação entre os blocos quebrou-se podendo estes deslocar-se de forma individual.



Fig. 4.37 - Vista de cima do modelo liso.



Fig. 4.38 - Vista de sotamar do modelo liso.

Outro aspeto possível de reparar nas imagens acima é a deposição de areia sobre os paramentos do bloco, tanto a barlar como a sotamar. Isto pode indicar que caso a fundação sobre a qual os blocos estão pousados tivesse algum tratamento preliminar de prevenção do assentamento, a eficiência do bloco na retenção dos sedimentos movimentados nos seus paramentos poderia ser maior, para este nível de maré.

Relativamente ao nível de preia-mar, os resultados obtidos são diferentes dos que se descreveram para o nível de maré mais baixo. Nas Fig. 4.39 e Fig. 4.40 é possível fazer a comparação entre as situações existentes antes e depois de se ter realizado esta série de testes.

Analisando primeiro o que aconteceu na zona envolvente ao bloco, através da fotografia captada na zona da janela de observação, verifica-se a ocorrência de duas situações distintas. A primeira é que a presença do bloco provocou, para este nível de maré, uma grande movimentação de sedimentos a sotamar da estrutura, associada à formação de um vórtice que resultou no aparecimento da cavidade de erosão que se observa no lado esquerdo da Fig. 4.39. Como resultado desse levantamento de sedimentos a sotamar dos blocos, estes eram transportados para barlar através das ondas refletidas pela praia, ficando parte depositados à frente do bloco como

comprovam as elevações que se observam com o auxílio da fita castanha colada no vidro. Apenas uma pequena parte dos sedimentos transportados para barlar regressavam a sotamar.

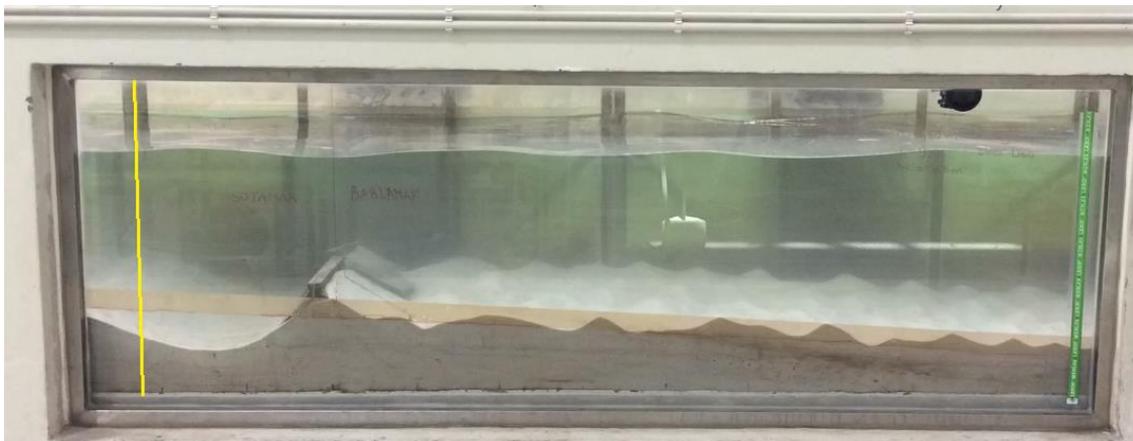


Fig. 4.39 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.

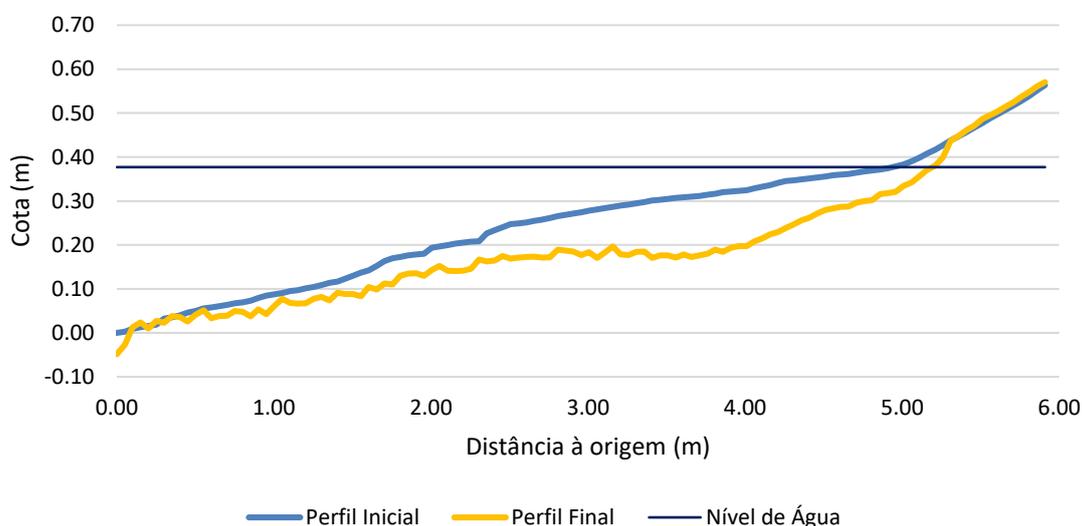


Fig. 4.40 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.

O volume de sedimentos que regressou a sotamar é visível nos primeiros metros do perfil transversal registados, onde a erosão verificada é menor do que na restante extensão do perfil. Este perfil começa com o registo de erosão que corresponde à parte final da cavidade que se vê na parte esquerda da Fig. 4.39, sendo depois o nível da praia praticamente coincidente com o nível inicial, por deposição dos sedimentos provenientes de barlar. Aproximadamente a partir dos 0.80 m do perfil, começa-se a registar um aumento progressivo da profundidade de erosão, que tem o seu máximo entre os 3.0 e os 4.0 m e se prolonga até ao início da zona de espraimento.

Na zona de espraimento, tendo em conta a menor energia da onda neste local, as alterações já são muito ligeiras, sendo os perfis quase coincidentes.

A zona de maior erosão corresponde ao sítio em que as ondas que conseguiam ultrapassar o bloco rebentavam, provocando uma maior deslocação de sedimentos neste local, que eram depois transportados para barlar e sotamar pelas ondas refletidas e incidentes, respetivamente.

Na Fig. 4.41 e Fig. 4.42, pode-se comparar a posição inicial e final do bloco, e perceber qual o seu comportamento durante a realização dos ensaios.

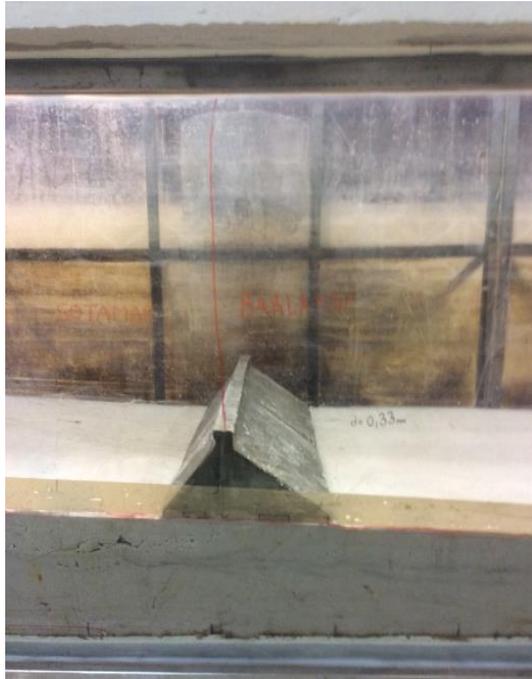


Fig. 4.41 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.



Fig. 4.42 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).

Mais uma vez registou-se a ocorrência de assentamento do bloco, resultado da erosão da fundação onde os blocos estavam assentes, tendo ocorrido também o deslizamento do bloco para sotamar. Estas alterações de posição são visíveis através do desenho do bloco no vidro.

Devido ao facto de também para este nível de maré os blocos não se encontrarem confinados aos 0.82 m de largura do canal, o assentamento dos blocos na extremidade provocou a quebra da ligação lateral dos dois módulos e o deslocamento consequente das duas estruturas isoladamente, em particular da situada mais próxima das divisórias, como se verifica na Fig. 4.43.



Fig. 4.43 - Posição final dos blocos do modelo liso, vista de cima.

É possível também reparar na deposição de areia sobre o paramento de barlamar, situação que ao contrário do que sucedia para o nível de baixa-mar não ocorre no paramento de sotamar. Uma das razões possíveis para a não retenção de sedimentos a sotamar do bloco, foi a formação de um vórtice neste local que acaba por levantar todas as partículas que pudessem ficar no paramento.

4.4.3.3. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Rugoso

O modelo rugoso do *SWED-Block*, que corresponde a uma variação do modelo liso com o paramento de barlamar em degraus que lhe conferem rugosidade, foi o caso estudado na série de ensaios que se analisa agora. O que se pretendia com esta solução era avaliar a influência da rugosidade na capacidade do bloco em dissipar a energia das ondas incidentes e de retenção dos sedimentos transportados pela agitação.

Na Fig. 4.44 e Fig. 4.45 apresenta-se a fotografia da zona visível a partir da janela de observação do tanque de ondas e o perfil transversal da praia na zona a sotamar do bloco, respetivamente.



Fig. 4.44 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.

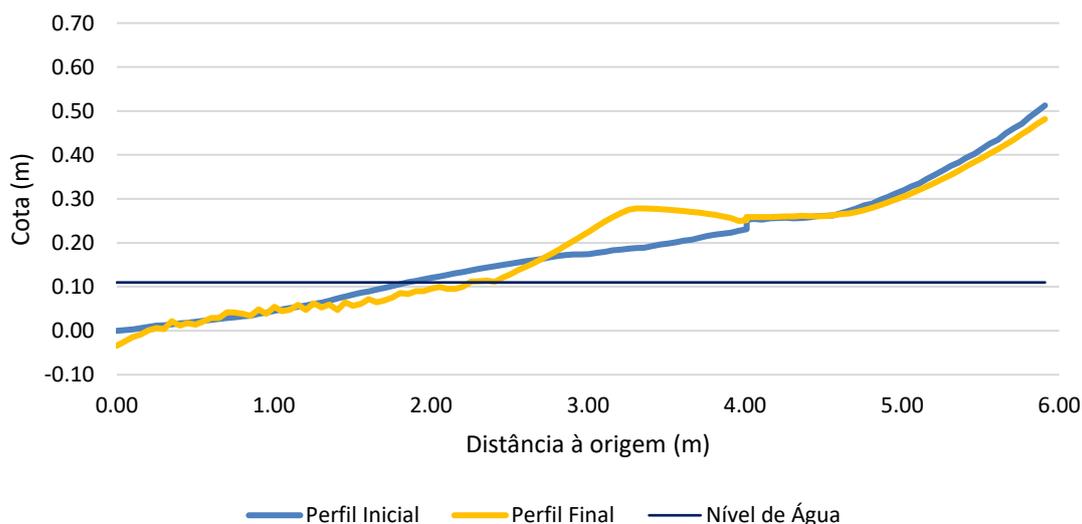


Fig. 4.45 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo rugoso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.

A grande alteração ocorrida nos ensaios para este modelo do bloco, é que este já se encontrava confinado à largura do canal tendo sido colocada entre a estrutura e o vidro e entre esta e a parede divisória um material compressível que apesar de impedir a passagem dos sedimentos pelo espaço existente, não limitam o deslocamento e rotação das estruturas.

O facto dos blocos estarem confinados à largura do canal fez com que o assentamento destes fosse menor quando comprado com o que aconteceu para o modelo liso, não existindo rotação da estrutura para este nível de maré. Uma das consequências da não ocorrência de rotação dos blocos foi a formação de uma cavidade de erosão para o nível de baixa-mar o que no caso dos modelos lisos só ocorreu para o nível de preia-mar. Esta fossa de erosão é visível na fotografia e no início do perfil transversal da praia.

A barlamar do bloco a situação é idêntica ao que se passou no modelo liso para o nível de preia-mar, os sedimentos que se soltaram a sotamar foram transportados para barlamar acabando uma parte destes por se depositar à frente do bloco. A outra parte dos sedimentos foi novamente transportada para sotamar, depositando-se após a zona erodida, aproximadamente entre os 0.20 m e o 1.20 m medidos pelo perfilador. Após esse local onde os perfis inicial e final são praticamente coincidentes, situa-se a zona de rebentação, o que originou alguma erosão até se atingir a zona de espraiamento onde se formou uma elevação do perfil da praia de quase 0.10 m.

Na parte final após os 4.0 m as alterações foram inexistentes mantendo-se os perfis inicial e final novamente coincidentes, uma vez que as ondas chegavam aquele ponto com pouca energia.

Na Fig. 4.46 e na Fig. 4.47 apresenta-se a posição inicial e final da estrutura do modelo rugoso do bloco, para o nível de baixa-mar.



Fig. 4.46 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.



Fig. 4.47 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).

Comparando as duas imagens repara-se que o bloco assentou, mas não sofreu praticamente nenhum deslocamento horizontal. Analisando a Fig. 4.47, verifica-se que o bloco ficou dentro dos limites da estrutura desenhada no vidro, situando-se apenas numa posição mais baixa.

A Fig. 4.48, apresenta a vista de cima dos blocos, e pode reparar-se em duas ocorrências distintas, no modulo mais próximo da parede divisória, à esquerda na imagem, não houve retenção de sedimentos nos paramentos após o assentamento da estrutura, já no outro bloco pode-se ver a areia depositada sobre o paramento de sotamar.



Fig. 4.48 - Posição final dos blocos do modelo rugoso, vista de cima.

A situação ocorrida para o nível de preia-mar é descrita na Fig. 4.49 e na Fig. 4.50, com este modelo do *SWED-Block*, formou-se novamente uma fossa de erosão a sotamar do bloco visível na fotografia e no início do perfil transversal. Mais uma vez os sedimentos provenientes deste local foram transportados para barlamar, local onde se depositaram parte das partículas movimentadas provocando a acreção que é visível na Fig. 4.49, tendo como referência para o perfil inicial a fita colada no vidro.

Os estados de agitação gerados nesta série de ensaios, não provocaram grandes alterações nos primeiros 3.0 m de praia, medidos pelo perfilador, após o final da fossa de erosão a sotamar do bloco, a erosão registada é bastante ligeira, podendo ser apenas micro rugosidades que se formam no fundo, por ação da passagem das ondas. Após os 3.0 m, encontra-se a zona de rebentação, sendo a erosão desta zona mais acentuada, devido à movimentação de sedimentos provocada pelo impacto das ondas sobre o perfil da praia. A onda após rebentar sofria espraiamento na zona situada entre os 4.80 m e o final do perfil.



Fig. 4.49 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.

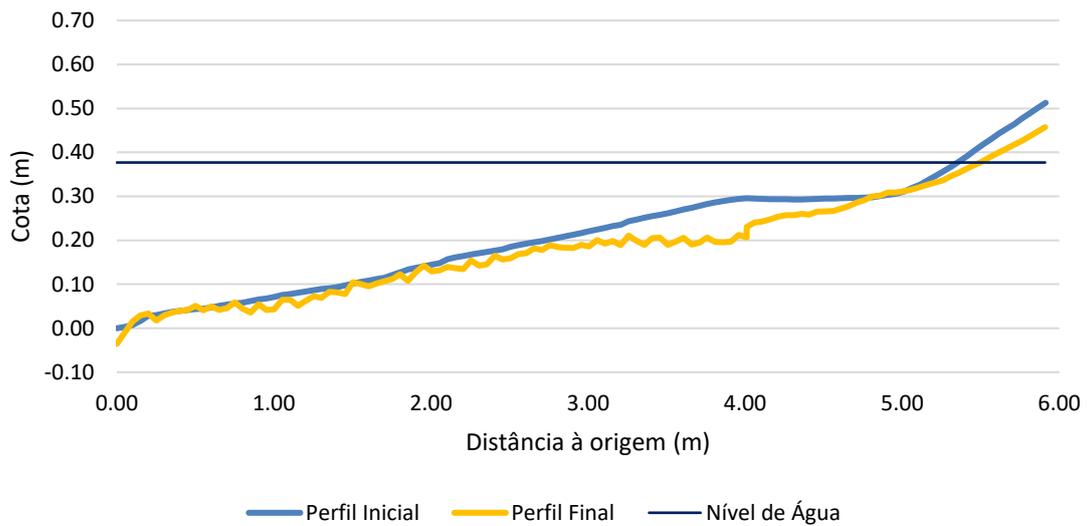


Fig. 4.50 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo rugoso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.

O perfil no final da praia volta a divergir do nível registrado para o perfil inicial após os 5.3 m, pois nas condições de agitação usadas para os testes deste nível de maré, o espriamento de algumas ondas ia para além dos 6.0 m medidos pelo perfilador. Estas ondas quando refletidas pela praia, provocavam a movimentação dos sedimentos em direção a barlar, contribuindo para a acreção em diversos locais do perfil transversal.

Na Fig. 4.51 e Fig. 4.52 estão representadas a posição inicial e final da estrutura do modelo rugoso do *SWED-Block*, para o nível de preia-mar.



Fig. 4.51 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.



Fig. 4.52 - Bloco na posição final (o desenho a preto no vidro representa a posição inicial).

A Fig. 4.52 permite verificar que a estrutura do bloco assentou. As medições efetuadas na janela apontam para um assentamento na ordem dos 0.06 m junto ao vidro, contudo, na mesma imagem, é visível que o assentamento na zona central dos blocos foi ligeiramente superior, uma vez que se observa uma flecha na zona de interligação dos blocos.

A vista de cima dos blocos é apresentada na Fig. 4.53. Dado que nestes ensaios os módulos da estrutura se encontravam confinados à totalidade da largura do canal, a interligação entre os blocos manteve-se até ao final dos testes. É possível ainda reparar na deposição de sedimentos sobre os degraus do paramento de barlar do bloco. Contudo este modelo não foi eficiente na fixação de sedimentos a barlar ou a sotamar do local onde se situa o bloco. A não fixação de sedimentos no paramento de sotamar é explicada, também neste caso, pela formação do vórtice a sotamar do bloco que levantou as partículas que se depositaram sobre a estrutura.



Fig. 4.53 - Posição final dos blocos do modelo rugoso, vista de cima.

4.4.3.4. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Poroso

Como já foi mencionado, este modelo do *SWED-Block* introduz duas novas propriedades com grande influência na dissipação da energia das ondas incidentes e refletidas, que são a porosidade e a permeabilidade.

Na Fig. 4.54 e Fig. 4.55 é visível o resultado final dos ensaios realizados com este modelo do bloco, para o nível de baixa-mar. A barlar da estrutura, o perfil da praia pouco se alterou tendo ocorrido apenas uma ligeira situação de acreção imediatamente após o bloco, com sedimentos provavelmente provenientes do lado de sotamar do bloco. É a sotamar do bloco que se encontram os principais problemas de erosão para este modelo, ainda que a diminuição de areia seja ligeira. Pela Fig. 4.54 é possível observar a ocorrência de descalçamento do bloco junto ao vidro e o abaixamento da cota do perfil da praia a sotamar do bloco. No entanto, pela observação do perfil transversal da praia, verifica-se que, até aos 2.0 m da extensão medida pelo perfilador os perfis inicial e final são bastante próximos. Na distância à origem entre os 2.0 e os 3.0 m, observa-se a existência de uma situação de erosão, seguida de uma elevação do nível do perfil da praia, que corresponde, respetivamente, às zonas de rebentação e espraçamento das ondas, para o nível de baixa-mar. Na restante extensão da praia medida os perfis inicial e final são similares.



Fig. 4.54 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.

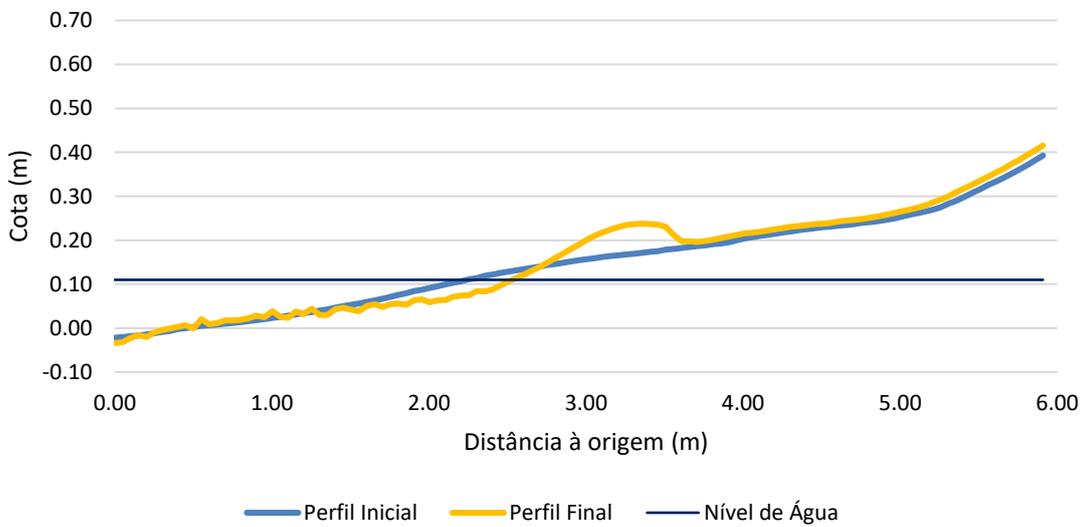


Fig. 4.55 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo poroso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.

Na Fig. 4.56 e Fig. 4.57 estão representadas as posições inicial e final da estrutura do modelo poroso do *SWED-Block*, para o nível de baixa-mar. Através destas figuras consegue-se perceber qual foi o comportamento do bloco perante a ação das ondas nas condições de agitação geradas.

Comparando a posição inicial com a posição final, percebe-se que, para este nível de maré o bloco ficou descalçado, sofrendo assentamento e posteriormente rotação para sotamar. O deslocamento do bloco da sua posição inicial afeta negativamente a sua eficiência na função de dissipação da energia das ondas incidentes. Através da observação do decorrer dos ensaios foi possível verificar que a rotação do bloco ocorre após o seu descalçamento, por força da rebentação das ondas sobre a estrutura. É também possível assumir que o descalçamento não ocorreu de igual forma em toda a largura do canal na base dos blocos, pois apesar da estrutura ter assentado e rodado, esta estabilizou na posição que se verifica na Fig. 4.57, mesmo não tendo areia por baixo na extremidade junto ao vidro.

Na imagem não é muito visível o interior do bloco, devido à fita que está colada no vidro. No entanto, por observação direta, verificou-se que no final dos ensaios existia a areia retida no espaço interior da estrutura. Contudo, a duração dos ensaios não foi suficiente para que o volume de sedimentos acumulados fosse superior.



Fig. 4.56 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.



Fig. 4.57 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).

A Fig. 4.58 representa a posição dos blocos do modelo poroso no final dos ensaios para o nível de maré de baixa-mar. Apesar de ter existido assentamento e rotação do bloco, a ligação entre as duas estruturas não se quebrou, mantendo-se estas alinhadas. Esta situação foi mais uma vez possível devido ao facto de se ter confinado os blocos à largura total do canal de ensaios.

Ao contrário do que aconteceu em alguns ensaios dos modelos liso e rugoso, para esta estrutura perfurada, não ocorreu deposição de areia no paramento de barlamar do bloco, possivelmente por se ter gerado, através das aberturas existentes neste elemento, um circuito de circulação de água e de sedimentos que impossibilitou que estes se depositassem sobre a estrutura.

No paramento de sotamar uma vez que neste modelo o seu talude é vertical, não ocorreu a deposição de sedimentos sobre o mesmo.

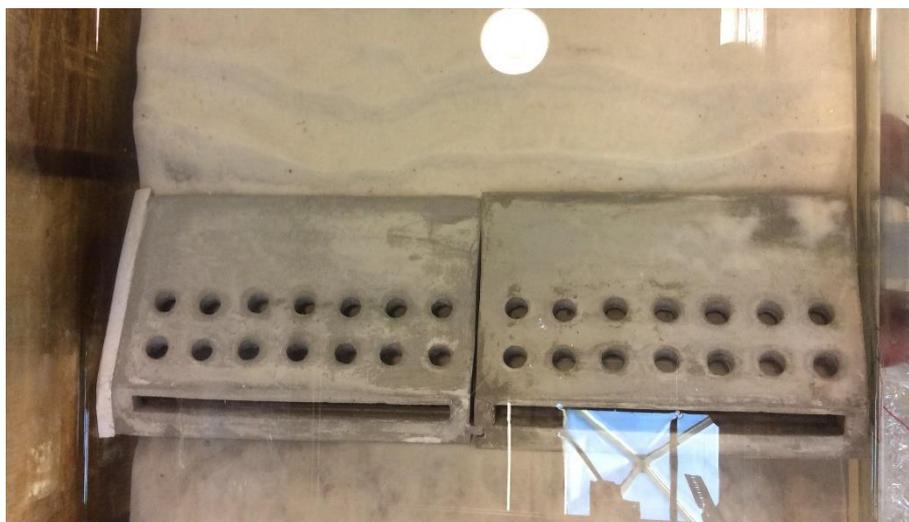


Fig. 4.58 - Posição final dos blocos do modelo poroso, vista de cima.

Os resultados das alterações do perfil transversal da praia obtidos para o nível de preia-mar, com modelo poroso do *SWED-Block*, podem ser observados na Fig. 4.59 e na Fig. 4.60.



Fig. 4.59 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.

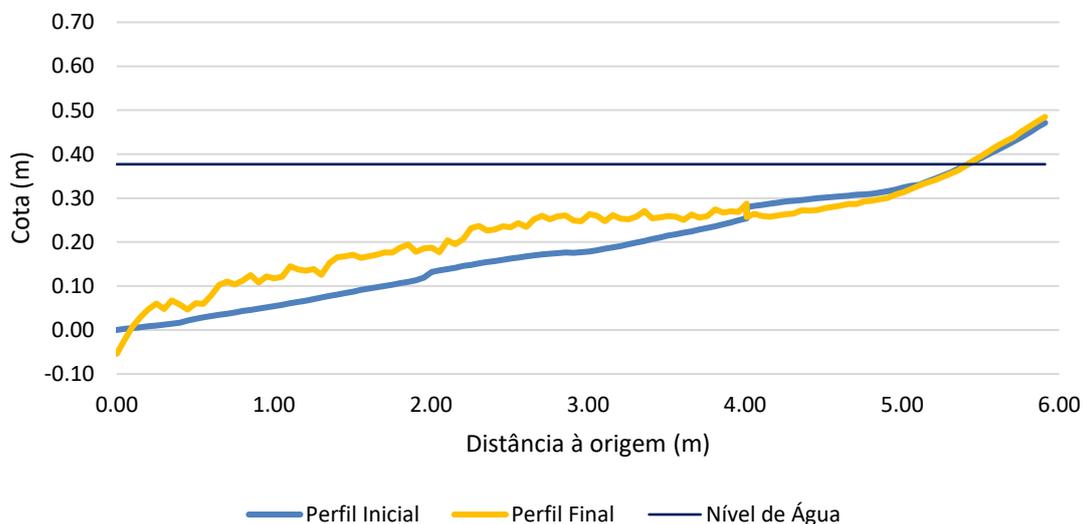


Fig. 4.60 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo poroso, antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.

Ao contrário do que sucedeu com este modelo para o nível de baixa-mar, para o nível mais elevado de maré já é novamente visível a formação de uma fossa de erosão a sotamar do bloco. Contudo, possivelmente pelo facto do paramento de sotamar ser vertical, a fossa de erosão movimentou-se para sotamar. Nos modelos liso e rugoso o talude do paramento de sotamar fazia uma inclinação de 50° com a horizontal, sendo que o “vórtice” de sedimentos que se formava aproveitava o talude do bloco para continuar o seu movimento. O deslocamento da cavidade erodida para sotamar permitiu que o bloco permanecesse apoiado, não tendo a areia que se situava a baixo da estrutura sido transportada para outro local. A areia proveniente da fossa de erosão, com uma largura aproximada de 0.44 m e uma profundidade de 0.08 m, foi transportada para sotamar e para barlamar pela ação das ondas que passavam pelo local. A barlamar do bloco nota-se a existência de pequenas elevações no nível do perfil da praia, sendo alguma da areia aí existente proveniente da zona a sotamar do bloco, mas também do início da praia a barlamar da janela de observação.

Relativamente à situação que se pode visualizar no perfil transversal da Fig. 4.60, a extensão de quase 4.0 m, localizada após a fossa de erosão, foi alvo de um processo de acreção tendo a cota

da praia subido em alguns locais perto de 0.10 m. Na zona de rebentação e na zona de espraiamento, os perfis voltam a ser coincidentes, não se registando alterações significativas.

Sendo este o nível de maré para o qual as condições de agitação geradas são mais severas, o que se observa no perfil transversal da praia para este modelo é bastante positivo, uma vez que este modelo foi capaz de potenciar os processos de acreção, quase não existindo erosão fora da zona imediatamente a sotamar do bloco.

Na Fig. 4.61 e Fig. 4.62 estão representadas as posições da estrutura antes e depois de se ter realizado os ensaios relativos ao nível de preia-mar, para o modelo poroso do *SWED-Block*.



Fig. 4.61 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de PM.



Fig. 4.62 - Bloco na posição final, (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).

Comparando as duas imagens anteriores verifica-se que este modelo não sofreu assentamento nem rotação para o nível de preia-mar, o que se justifica pela deslocação da fossa de erosão e vórtice formado pela deslocação dos sedimentos para sotamar, devido ao paramento vertical do bloco. Assim, o movimento de sedimentos gerado pela agitação marítima não provocou o descalçamento do bloco, tendo este permanecido na posição inicial. É também visível, uma vez que se retirou a fita que estava colada no vidro neste local, a retenção e acumulação de sedimentos no interior do bloco, cumprindo-se assim um dos objetivos desta solução perfurada, que era o de impedir que os sedimentos fossem transportados pelas ondas refletidas para barlar.

Na Fig. 4.63, através de uma vista de cima da estrutura, é possível ver que a ligação entre os blocos se manteve, uma vez que também nesta série de ensaios os blocos se encontravam confinados à largura total do tanque de ondas. Verificam-se, também, pequenas deposições de sedimentos nas extremidades de ambos os módulos da estrutura sobre o paramento de barlar, junto à parede divisória e à janela de observação do tanque de ondas. Uma vez que não se registou a ocorrência de assentamento ou rotação da estrutura, esta posição corresponde também à posição inicial dos blocos.



Fig. 4.63 - Posição final dos blocos do modelo poroso, vista de cima.

4.4.3.5. Cenário de Praia Protegida pelo Modelo Liso com 0.20 m

As duas últimas séries de ensaios foram realizadas com uma nova configuração do modelo liso do bloco, tendo sido utilizados dois módulos com 0.20 m de comprimento, e um com 0.40 m de comprimento. Como o conjunto dos blocos ocupava apenas 0.80 m dos 0.82 m de largura do canal, procedeu-se, novamente, ao confinamento dos blocos com um material compressível que não impedisse os movimentos da estrutura em caso de ocorrência de descalçamento.

Nestas duas séries de ensaios, o objetivo principal já não era tanto analisar a influência do bloco nas alterações do perfil da praia, mas antes avaliar o comportamento isolado de cada um dos módulos quando solicitados pela ação das ondas que incidiam sobre a estrutura. Para tal, os blocos utilizados não possuíam as ligações laterais presentes nos outros modelos, estando assim livres de se movimentarem individualmente.

Os testes começaram, tal como nos restantes modelos, pelo nível de maré mais baixo correspondente ao nível de baixa-mar. Previa-se, inicialmente, que a falta de ligação entre os blocos tivesse uma maior influência no seu comportamento para este nível de maré, uma vez que as ondas nestas condições podem rebentar sobre estes. No caso em que não rebentam, a energia das ondas incidentes sobre a estrutura é maior para este nível que no nível de preia mar. Na Fig. 4.64 e na Fig. 4.65 apresentam-se as alterações do perfil transversal da praia para este nível.

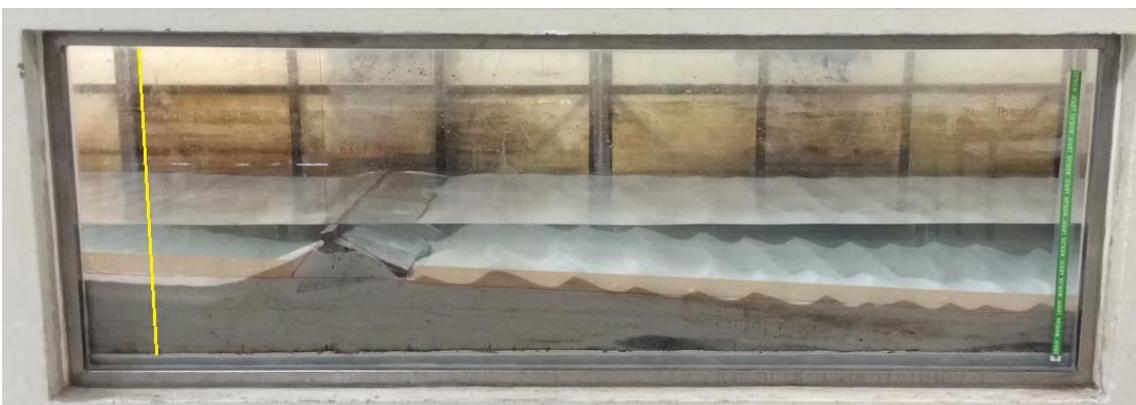


Fig. 4.64 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de BM.

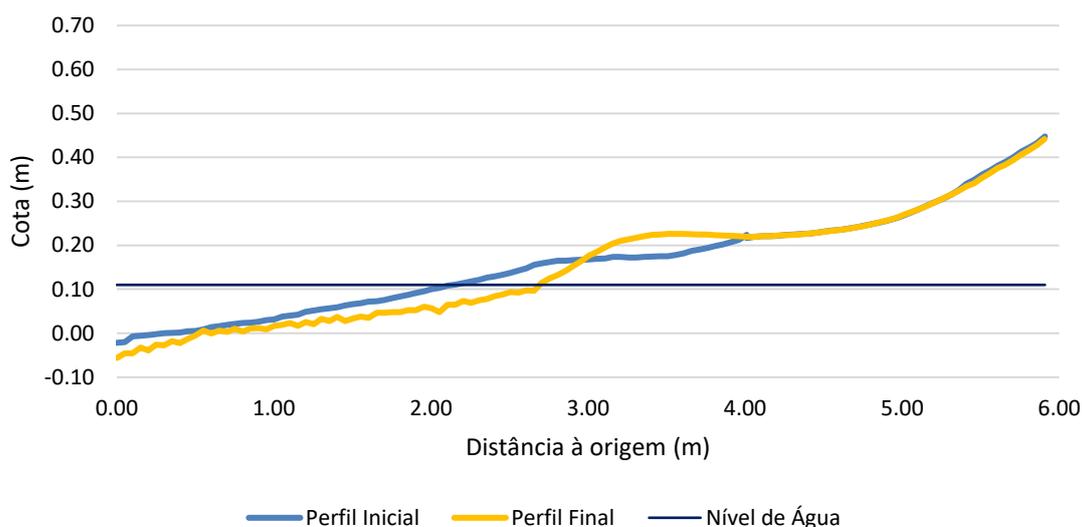


Fig. 4.65 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso (0.20 m), antes e depois da ação das ondas, para o nível de BM.

Na Fig. 4.64 é possível verificar que os blocos se movimentaram, sofrendo uma rotação para sotamar. Ao nível do perfil da praia é ainda possível ver que a barlar da estrutura, ocorreram poucas alterações, sendo as elevações registadas e normalmente designadas por “ripples”, as normais ondulações presentes nos fundos marinhos, devido à ação das ondas sobre estes. Já a sotamar do bloco é possível observar que ocorreu uma ligeira situação de erosão, situação que se verifica também no início do perfil transversal da Fig. 4.65. Continuando a observar o perfil transversal pode constatar-se que continua a existir erosão numa faixa situada entre a distância de 1.0 m e de aproximadamente 3.0 m, sendo que depois se verifica uma situação de acreção, até que os perfis inicial e final voltam a ser coincidentes. A erosão e acreção que ocorreram nesses locais estão ligados à ação das ondas em cada um desses sítios. O troço da praia onde ocorreu um processo erosivo corresponde à zona de rebentação, caracterizada por uma forte movimentação de sedimentos, que são posteriormente transportados pelas ondas para sotamar, ficando depositados na zona de espraiamento, provocando assim a situação de acreção observada.

Relativamente ao posicionamento dos blocos, nas Fig. 4.66 e Fig. 4.67, é possível verificar que ocorreu assentamento e rotação do bloco para sotamar, sendo visível no desenho do vidro o posicionamento inicial dos blocos. De acordo com o que foi visualizando durante os três ensaios realizados para este nível de maré, a fundação da estrutura foi sendo gradualmente erodida, provocando o descalçamento dos módulos. Como em situação de baixa-mar as ondas por vezes rebentavam precisamente sobre o bloco, o impacto destas sobre a estrutura, fez com que o bloco assentasse e rodasse em direção a sotamar. Após a estabilização do bloco numa nova posição de equilíbrio, verificou-se a formação de uma camada de deposição de sedimentos sobre o paramento de sotamar. Este facto terá contribuído para que a erosão a sotamar da estrutura fosse menor do que a observada para os outros casos analisados.

Na Fig. 4.68, que apresenta a vista de cima da estrutura, pode observar-se que a acumulação de sedimentos a sotamar só aconteceu nos módulos mais próximos da janela, tendo o bloco mais próximo da placa divisória sofrido um ligeiro descalçamento na base. Verifica-se, também, que os blocos se comportaram como estruturas independentes, tendo a estrutura com 0.40 m, sofrido um ligeiro deslocamento horizontal na direção de sotamar.



Fig. 4.66 - Bloco na posição inicial, antes de ser testado para o nível de BM.



Fig. 4.67 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).



Fig. 4.68 - Posição final dos blocos do modelo liso com 0.20 m, vista de cima.

A última série de ensaios foi realizada para a mesma configuração de blocos, desta vez com o nível de maré de preia-mar. Através da Fig. 4.69 e Fig. 4.70 é possível observar a zona visível pela janela de observação e o perfil transversal da restante extensão da praia, respetivamente. Em grande parte da extensão da praia não se registaram alterações ao perfil inicial, com a exceção de duas zonas onde ocorreram situações de erosão. Estas zonas situam-se ambas a sotamar do bloco, sendo uma imediatamente após o local da estrutura, onde se formou a fossa de erosão descrita para os outros modelos testados, e outra na zona de rebentação. Em alguns troços da praia como o situado a barlamar do bloco, e na zona entre os 0.15 m e os 2.15 m medidos pelo perfilador, apenas se registou a formação de pequenas elevações do perfil, normais para as áreas submersas.



Fig. 4.69 - Estado final do perfil transversal da praia depois da ação das ondas, para o nível de PM.

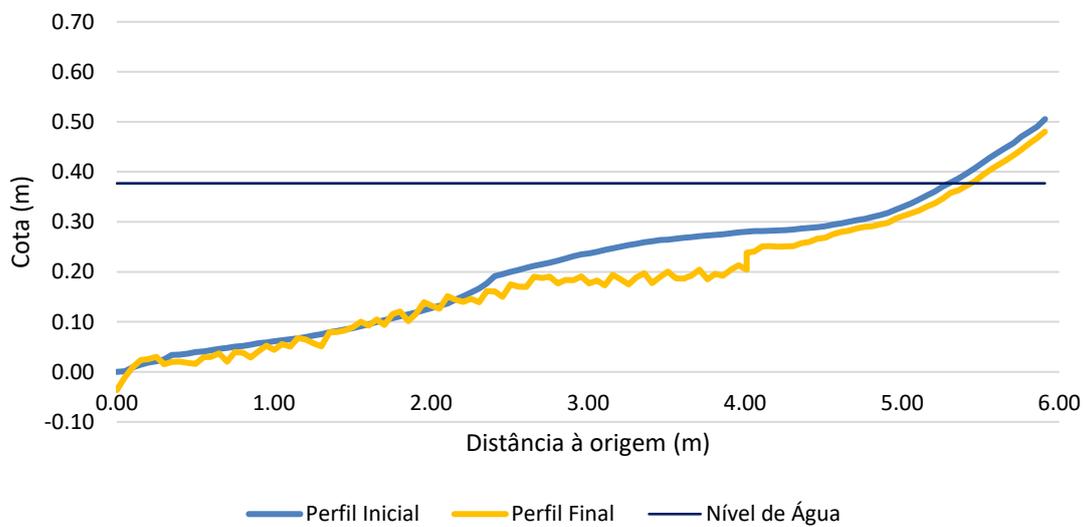


Fig. 4.70 - Perfil transversal da praia protegida pelo modelo liso (0.20 m), antes e depois da ação das ondas, para o nível de PM.

Na Fig. 4.71 verifica-se que o bloco se manteve na posição inicial, através da comparação com o desenho da estrutura (a vermelho) no vidro da janela do tanque de ondas. O facto de não ter ocorrido assentamento nem rotação do bloco, permitiu ao bloco ter maior eficiência, o que se comprovou anteriormente pelas ligeiras alterações registadas no perfil da praia após a realização dos ensaios.

Contudo, sendo o principal objetivo deste estudo, a avaliação do comportamento isolado de cada um dos módulos quando solicitados pela ação das ondas que incidem sobre a estrutura, é necessário observar a Fig. 4.72. Nesta figura verifica-se que apesar de não existir interligação entre os módulos, estes mantiveram-se alinhados o que sendo este o nível de maré com as condições de ensaio mais severas, pode significar que tanto a influência das estruturas sobre a agitação marítima gerada, como o a influência da agitação nas estruturas foi bastante pequena.

Importa, ainda, referir a acumulação de sedimentos sobre o paramento de barlar do bloco, uma situação possível pelo facto de não terem ocorrido alterações significativas do perfil transversal na extensão de praia a barlar das estruturas.



Fig. 4.71 - Bloco na posição final (o desenho a vermelho no vidro representa a posição inicial).



Fig. 4.72 - Posição final dos blocos do modelo liso com 0.20 m, vista de cima.

Após ter sido realizada uma análise do comportamento hidráulico para os cinco cenários anteriores, é possível perceber qual dos modelos foi mais eficiente no comprimento dos objetivos que se pretendia.

Através dos perfis obtidos para o cenário de praia desprotegida, para ambos os níveis de maré, pode-se concluir que as condições de ensaio não foram tão desfavoráveis como se desejava. De facto, para o nível de baixa-mar as alterações na maior parte do perfil são ligeiras, existindo no final da praia a formação de uma elevação por acreção. Já para o nível de preia-mar registou-se acreção em grande parte da extensão da praia, o que não era previsto, uma vez que se pretendia ter condições de teste que fossem desfavoráveis.

4.4.3.6. Síntese do comportamento das diferentes configurações do bloco

Analisando agora os vários modelos e configurações do *SWED-Block*, a solução com o pior comportamento foi o modelo liso na configuração de dois módulos com 0.40 m. Contudo importa referir que as condições de teste neste caso não foram iguais aos dos restantes modelos, pois a estrutura não estava confinada à largura do canal. Para os dois níveis de maré, na presença deste modelo, ocorreu a erosão do perfil da praia.

O modelo rugoso apresentou algumas melhorias, ainda assim limitou-se praticamente a não permitir grandes alterações na maior parte do perfil da praia, havendo a formação de um banco de acreção para o nível de baixa-mar na zona de espraiamento e uma situação de erosão na zona de rebentação para o nível de preia-mar.

Os melhores resultados foram obtidos para o modelo poroso, que na situação de baixa-mar na maior parte do perfil conseguiu que não ocorressem grandes alterações da cota da praia, embora havendo uma situação de erosão na zona de rebentação. Para o nível de preia-mar este modelo foi o único capaz de provocar uma acreção significativa de areia no perfil da praia, cumprindo assim um dos principais objetivos do desenvolvimento deste bloco, já que este era o nível de maré que apresentava as condições de teste mais desfavoráveis.

O modelo liso com uma configuração de dois blocos com 0.20 m e um com 0.40 m, teve um comportamento similar a outros modelos para o nível de baixa-mar. Já para o nível de preia-mar, este modelo conseguiu que as alterações ao perfil da praia fossem mínimas em parte da extensão medida, contudo não impediu o processo de erosão na zona de rebentação das ondas.

Na Fig. 4.73 e Fig. 4.74 apresenta-se a sobreposição de todos os perfis finais obtidos, para os níveis de baixa-mar e de preia-mar, respetivamente. Apesar de não se conseguir visualizar de igual forma todos os perfis, é possível verificar os diferentes resultados obtidos para as diferentes soluções.

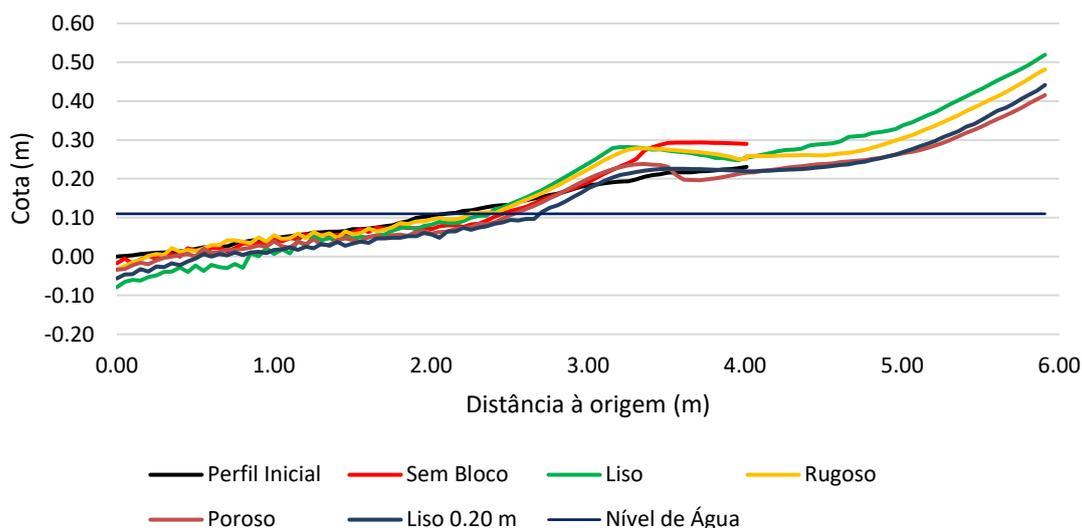


Fig. 4.73 - Comparação entre o perfil inicial da praia e todos os perfis finais obtidos, para o nível de PM.

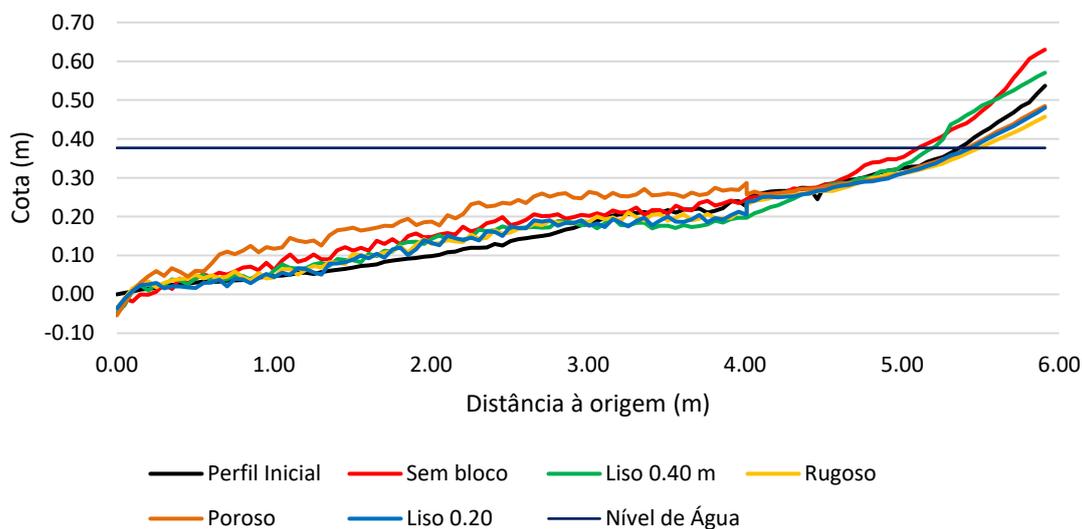


Fig. 4.74 - Comparação entre o perfil inicial da praia e todos os perfis finais obtidos, para o nível de BM.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Existem várias estruturas de proteção costeira semelhantes à que foi desenvolvida no âmbito desta dissertação, no entanto, as informações disponíveis acerca dos métodos utilizados no processo de dimensionamento e sobre os estudos realizados, quer em modelo, quer em protótipo, são bastantes escassas. Por outro lado, os métodos existentes para o dimensionamento de obras de proteção costeira tradicionais, sendo baseados em fórmulas empíricas, têm um campo de aplicação muito específico e limitado, não se adequando a estruturas do tipo do bloco de proteção costeira desenvolvido.

Dada a severidade das condições a que estas estruturas poderão estar expostas, é necessário considerar diversas variáveis para efetuar o seu dimensionamento, de forma a garantir que estas têm um bom comportamento hidráulico e de estabilidade. A presente dissertação teve como objetivo o estudo do comportamento hidráulico e de estabilidade de um bloco inovador de proteção costeira, sendo para tal necessário efetuar o seu dimensionamento e avaliação da sua eficiência através de ensaios laboratoriais em modelo físico.

Os resultados obtidos através do trabalho experimental (analisados no capítulo 4), permitiram avaliar o comportamento da estrutura em relação à reflexão e à capacidade de mitigar ou prevenir eventuais problemas de erosão costeira. Para tal, foram utilizados três modelos do bloco com o intuito de avaliar a importância de propriedades como a rugosidade, a porosidade e a permeabilidade no desempenho hidráulico da estrutura. Todos os modelos foram testados para dois níveis extremos de maré e várias condições de agitação marítima, sendo umas mais favoráveis e outras mais severas. Dada as diferentes configurações de cada modelo, os resultados obtidos foram, naturalmente, diferentes para cada solução, como se demonstrou ao longo do capítulo 4.

Para os dois níveis de maré estudados, correspondentes ao nível de baixa-mar e de preia-mar, os resultados obtidos foram diferentes, quer em termos de reflexão, quer ao nível da alteração do perfil transversal da praia e do comportamento em relação à estabilidade estrutural dos blocos. Das várias conclusões obtidas é possível destacar:

- A eficiência dos blocos relativamente à reflexão melhorou para as alturas de onda mais elevadas, sendo o coeficiente de reflexão maior para o nível de preia-mar.
- O comportamento em relação à estabilidade estrutural do bloco, ao nível do assentamento da fundação, que se caracteriza pelo deslizamento e rotação a sotamar do bloco é melhor para o nível de preia-mar. Com efeito, o nível mais baixo de maré corresponde a condições bastante desfavoráveis na medida em que há rebentação das ondas sobre a estrutura.

- As alterações ao perfil batimétrico por ocorrência de processos de erosão e acreção foram também distintas para os dois níveis de maré. Relativamente a este aspeto, a presença do bloco é determinante para as alterações ocorridas. A influência do nível de maré no processo acrecivo e erosivo verificava-se essencialmente nas zonas de rebentação e de espraçamento.
- O coeficiente de reflexão obtido foi menor na estrutura perfurada, do que nos modelos maciços. O paramento vertical da estrutura existente na estrutura perfurada influenciou positivamente a estabilidade do bloco para o nível de preia-mar, não ocorrendo o assentamento da estrutura devido à erosão a sotamar.

5.2. DESENVOLVIMENTO FUTUROS

Tendo como objetivo complementar o trabalho realizado na presente dissertação, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

As sugestões que se apresentam são baseadas em situações observadas durante a realização dos ensaios, e visam melhorar a eficiência dos blocos no cumprimento dos objetivos pretendidos. Estas melhorias não foram efetuadas no presente trabalho por limitações do tempo para a execução da dissertação e de disponibilidade do laboratório para a realização dos ensaios.

Para melhorar a eficiência do bloco do ponto de vista hidráulico e estrutural sugere-se o seguinte:

- Para prevenir o assentamento da estrutura e posterior rotação para sotamar, seria necessário proceder a um trabalho prévio de preparação da fundação, de forma a impedir que os sedimentos sobre os quais as estruturas são implementadas, sejam arrastados pela agitação marítimas, ocorrendo o descalçamento dos blocos. Uma solução possível seria a construção de uma fundação à base de enrocamento, como a utilizada nos quebra-mares, conhecida como tapete de enrocamento de proteção. Neste caso os custos de implantação da obra seriam maiores.
- Também a secção transversal do bloco poderia ser alterada de forma a incorporar um elemento que minimizasse os efeitos do assentamento na eficiência hidráulica. Por exemplo, poder-se-ia prolongar o elemento de fundação mais próximo do paramento de sotamar, constituindo uma espécie de barreira à remoção dos sedimentos da base.
- Poderia ser estudada também a opção de colocar os blocos mais próximo da costa, para aumentar a eficiência na dissipação da energia das ondas incidentes, principalmente para o nível de preia-mar, contudo os blocos ficavam a descoberto em baixa-mar, comprometendo umas das suas principais características que é ser uma estrutura submersa.
- Ao nível das características da estrutura as propriedades como a rugosidade, a porosidade e a permeabilidade, poderiam ser melhor estudadas com novas geometrias da secção transversal do bloco, de forma a aumentar a rugosidade e a porosidade. Importa referir que a solução porosa utilizada no presente trabalho tinha um grau de porosidade inferior aos valores de referência.
- Realizar também os estudos necessários usando modelos de CFD, *Computational Fluid Dynamics*, designadamente um modelo do tipo RANS, *Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations*.

Estas novas geometrias e configurações do bloco apresentariam, certamente, resultados diferentes dos conseguidos no presente trabalho, contudo são apenas o ponto de partida para trabalhos futuros, sendo que o seu papel no aumento da eficiência do bloco no cumprimento dos seus objetivos teria de continuar a ser testado laboratorialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agerschou, H., Dand, I., Torben, E., Ghooos, H., Juul Jensen, O., Korsgaard, J., Land, J. M., McKay, T., Oumeraci, H., Petersen, J. B., Runge-Schmidt, L., Svendsen, H. L. (2004). *Planning and Design of Ports and Marine Terminals, 2nd Edition*. Editora Thomas Telford Books. London, UK.

Allsop, N. W. H. (1998). *Coastlines, Structures and Breakwaters*. Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 19-20 March 1998. Editora Thomas Telford Books. London, UK. ISBN 0 7277 2668 4

Bergmann, H., Oumeraci, H. (2000). *Wave loads on perforated caisson breakwaters*. Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, ASCE.

Bleck, M. (2006). *Wave Attenuation by Artificial Reefs*. Am Sulzbogen 80; Fürstenfeldbruck; Germany, 33.

Carmo, J.S., (2014). *Obras Multifuncionais, um novo conceito de proteção costeira*. INGENIUM, Nº141, pp.44-45. Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Portugal.

Coelho, C. (2014). *As Intervenções de Defesa Costeira na Mitigação do Problema da Erosão*. Conferências sobre o Litoral Português - Sessão 1 - Ponto de Situação e Experiência Acumulada nas Soluções de Defesa Costeira – 30 de abril de 2014, Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Portugal.

Corps of Engineers, U.S. Army (2004). *Low Cost Shore Protection: A Property Owner's Guide*. University Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii, USA. ISBN 1-4102-1501-6

Edge, B.L. *Coastal Engineering 1996*. Browder, A. E., Dean, R. G., Chen, R. (1996). Performance of a Submerged Breakwater for Shore Protection., pp. 2312 – 2323 ASCE Library ISBN 978-0-7844-7951-3

Gerritsen, F., Gomez-Pina, G., Mocke, G., (1985). *Risk Evaluation and Risk Avoidance in the Coastal Zone*. Department of Ocean Engineering, University of Hawaii, Hawaii, USA.

Kim, Young C. (2012). *Coastal and ocean engineering practice*. Pilarczyk, K. W., Coastal Structures in International Perspective. Series on coastal and ocean engineering practice; Vol.1. World Scientific. New Jersey, USA. ISBN 978-981-4360-56-2.

Kim, Young C. (2015). *Design of coastal structures and sea defenses*. Takahashi, S., Shimosako, K., Hanzawa, M., Performance Design for Maritime Structures. Series on coastal and ocean engineering practice; Vol. 2, World Scientific. New Jersey, USA. ISBN 978-9814611008.

Kim, Young C. (2010). *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Pilarczyk, K. W., Coastal Stabilization and Alternative Solutions. World Scientific. New Jersey, USA. ISBN 13 978-981-281-929-1 INSB 10 981-281-929-0

Ono, N. Irie, I. Yamaguchi. *Increasing Longevity of Nourished Beaches by Changing the Direction of Cross-Shore Sand Transport*. Dept. Civil Engineering, Kyushu University, Japan

Pilarczyk, K. W. *Alternatives for Coastal Protection*. TUDelft/HYDROpil Consultancy, Delft The Netherlands.

Pilarczyk, K. W., Zeidler, R. B., (1996). *Offshore breakwaters and shore evolution control*. A. A. Balkema Rotterdam, Roterdão, Países Baixos. ISBN 90-5410-627-1.

Rashidi, A. H. M., Jamal, M. H., Hamid, M. R. A., Sendek (2017). *Physical Hydraulic Modelling for the Development of Innovative Coastal Protection Structure in a 2-D Wave Flume*. E-proceedings of the 37th IAHR World Congress. Kuala Lumpur, Malaysia.

Seymour, R. J. (2005). *Cross-Shore Sediment Transport*. Encyclopedia of Coastal Science. M. L. Schwartz. Dordrecht, Springer, The Netherlands: 352-353.

Silva, R. C. A. F. d. (2010). *Avaliação experimental e numérica de parâmetros associados a modelos de evolução da linha de costa*. Tese de doutoramento. Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Stauble, D. K., Wise, R. A., Smith, J. B. (2005). *Monitoring of Beachsaver Reef with Filter Blanket and Double-T Sill at Cape May Point, New Jersey, Section 227 Demonstration Site*. National Shoreline Erosion Control Development and Demonstration Program, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA. ERDC/CHL TR-05-4

Taveira-Pinto, F. (2014). *O Fenómeno da Erosão Costeira*. Conferências sobre o Litoral Português - Sessão 1 - Ponto de Situação e Experiência Acumulada nas Soluções de Defesa Costeira – 30 de abril de 2014, Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Portugal.

Taveira-Pinto, F. (2012). Quebramares verticais (Elementos de apoio às aulas da disciplina Trabalhos Marítimos 2). FEUP, Porto, Portugal.

Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., Silva, R., Neves, L., Santos, P. R., Lopes, H. G., Neves, A. C. (2007). *O Novo sistema de Geração e Aquisição de Agitação Marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP*. 2.^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto, Portugal. ISBN 978-989-95557-1-6.

Veloso Gomes, F. (1993). *Erosão Costeira – Factores que Potenciam e Explicam a Aceleração das Taxas de Erosão na Costa Portuguesa*. Seminário sobre a Zona Costeira de Portugal, Ambiente, Gestão e Conservação – 7, 8 e 9 de julho de 1993. IST, Lisboa. Portugal.

Páginas WEB:

Agência Europeia do Ambiente. (2017, JUL. 17). *Sobre as alterações climáticas*. [online]. Disponível: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/climate/about-climate-change>

Agência Europeia do Ambiente. (2017, JUL. 17). *Mitigação dos efeitos das alterações climáticas*. [online]. Disponível: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/climate/intro>

Coastal Engineering. (2017, FEV. 15). *Coastal Issues in the Florida Keys*. [online]. Disponível: <http://cee514coastalanalysisfloridakeys.weebly.com/index.html>

Coastal and Hydraulics Laboratory Fact Sheets. (2017, FEV. 15). *Beachsaver Reef dimensions and configuration*. [online]. Disponível:

http://coastalhydraulicslaboratoryfact.tpub.com/FSBPA03Paper_final/FSBPA03Paper_final0006.htm

Coastal and Hydraulics Laboratory Fact Sheets. (2017, FEV. 15). *Double-T Sill Installation*. [online]. Disponível:

http://coastalhydraulicslaboratoryfact.tpub.com/FSBPA03Paper_final/FSBPA03Paper_final0007.htm

Coastal and Hydraulics Laboratory Fact Sheets. (2017, FEV. 15). *The Use of Submerged Narrow-Crested Breakwaters for Shoreline Erosion Control*. [online]. Disponível:

http://coastalhydraulicslaboratoryfact.tpub.com/coas_19_202_684_722/coas_19_202_684_722001.htm

Environmental Geology lecture outline. (2017, FEV. 25). *Shorelines and related environmental concerns. Some answers to questions*. Image of how groins interact with longshore drift. Image source: USGS [online]. Disponível:

<http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL1010/lecture14/shorelines2.html>

Geography Directions. (2017, FEV. 25). *Adapting to coastal change: understanding different points of view in coastal erosion management*. Happisburgh in 1996, 2006 and 2012 during which time it has lost a number of sea front properties - copyright Mike Page [online]. Disponível:

<https://blog.geographydirections.com/2013/11/01/adapting-to-coastal-change-understanding-different-points-of-view-in-coastal-erosion-management/>

Happisburgh Project. (2017, FEV. 15). *Ways to help....* Sea Defenses [online]. Disponível:

<http://happisburghproject.weebly.com/help.html>

Union of Concerned Scientist. (2017, FEV. 15). *Talking About Sea Level Rise: Leading Scientists Meet in Galveston, Texas*. A 10-mile long seawall, begun in the early 1900s after the worst natural disaster in U.S. history, extends along the coast of Galveston Island. Photo: M. Fitzpatrick [online]. Disponível:

<http://blog.ucsusa.org/melanie-fitzpatrick/talking-about-sea-level-rise-leading-scientists-meet-in-galveston-texas-114>

Wave Attenuator and Walkway Technology. (2017, FEV. 15). *Wave Attenuator - (W.A.W) - Atténuateur de Vague - Brise-Lames - Attenuatore d'Onda - BARRIERA in ADERENZA - Attenuatore del moto ondoso e passerella*. [online]. Disponível: <http://wawtech.net/>

ANEXOS

ANEXOS A

Espectros da Agitação Incidente e Refletida

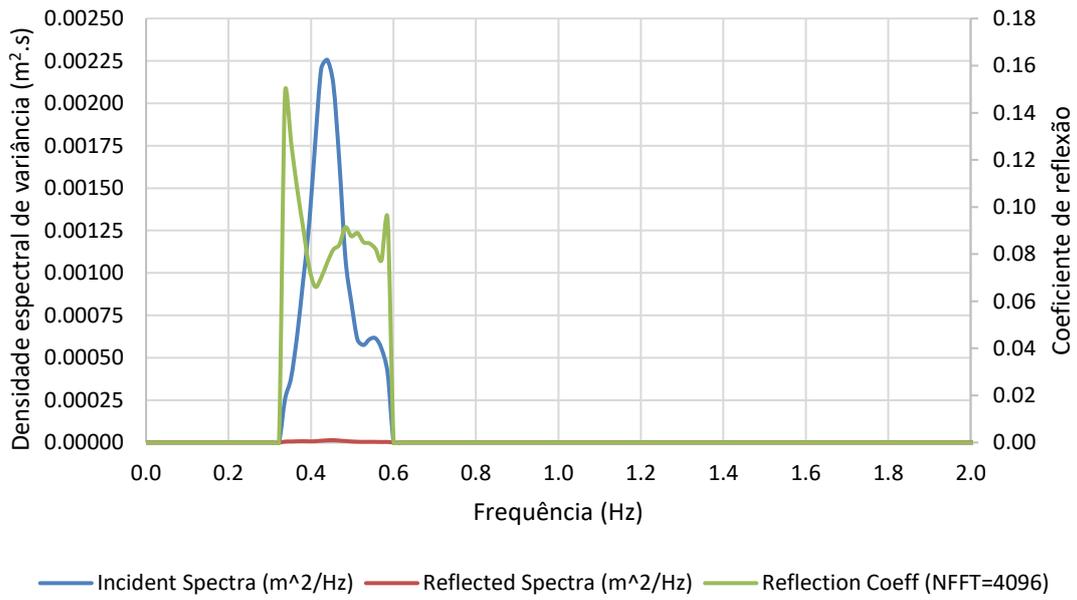


Fig. A 1 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para a praia sem bloco.

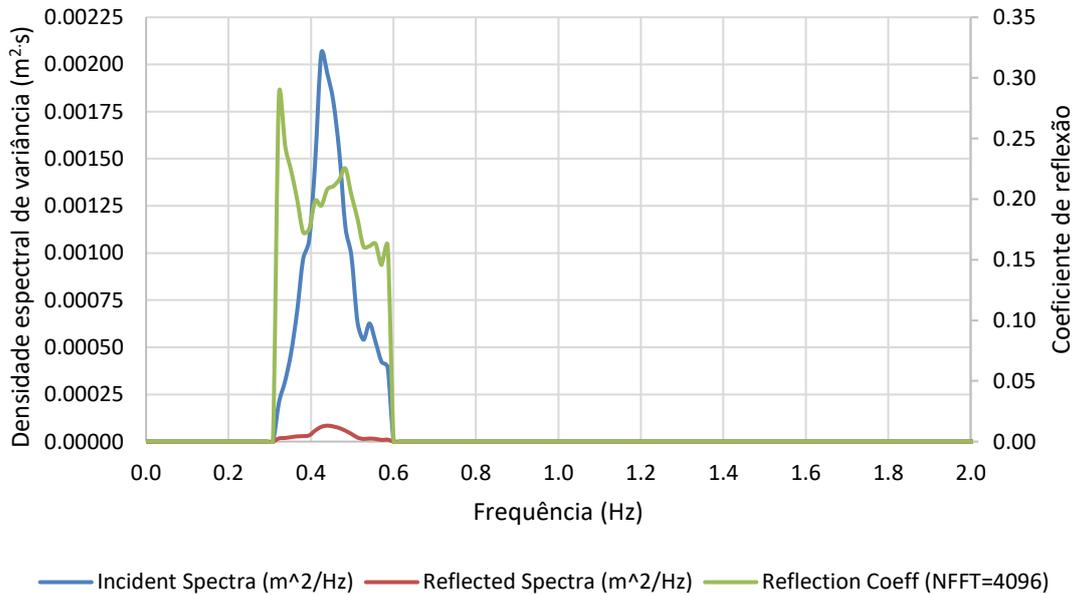


Fig. A 2 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

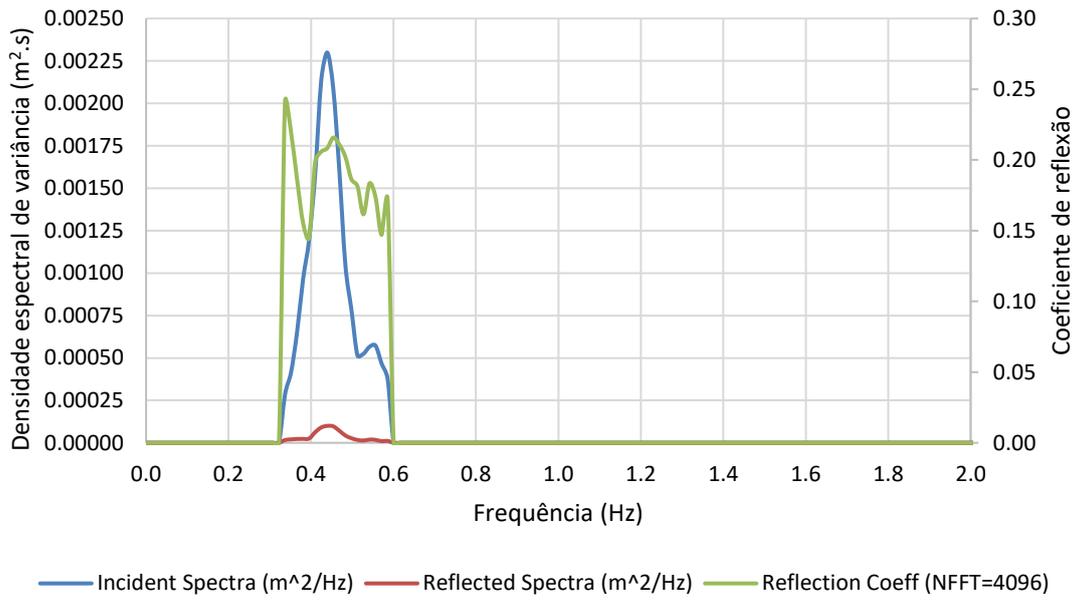


Fig. A 3 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para o modelo rugoso.

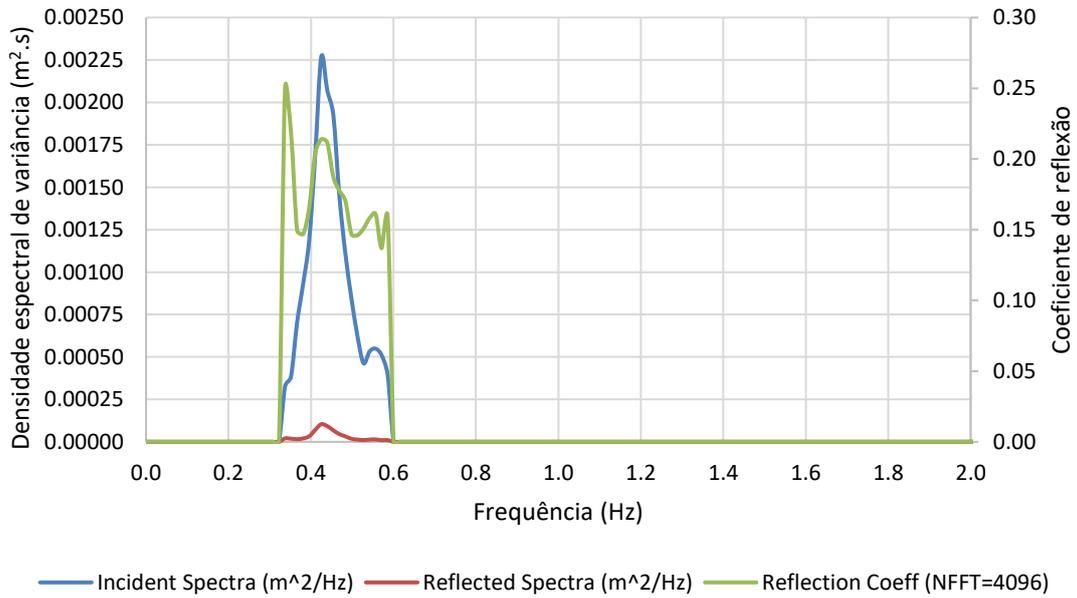


Fig. A 4 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para o modelo poroso.

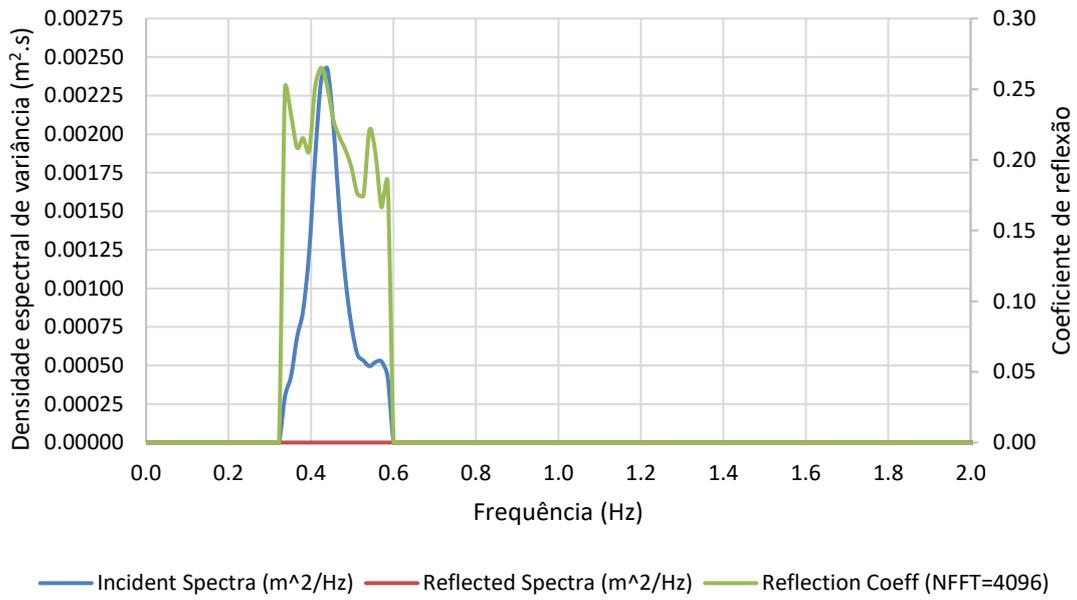


Fig. A 5 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=9$ s e $H_{si}=0.06$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

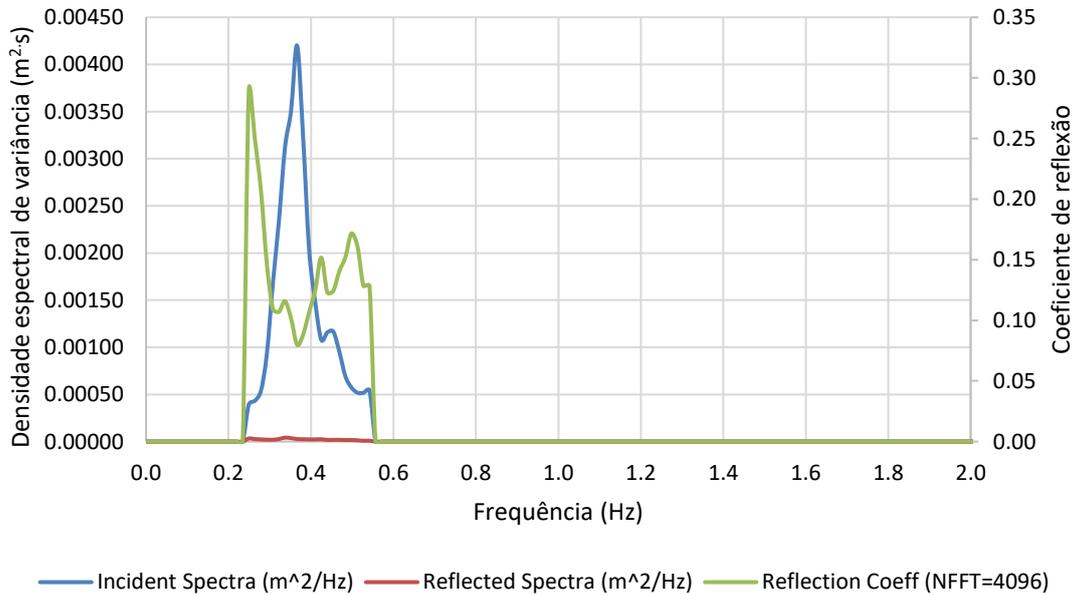


Fig. A 6 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para a praia sem bloco.

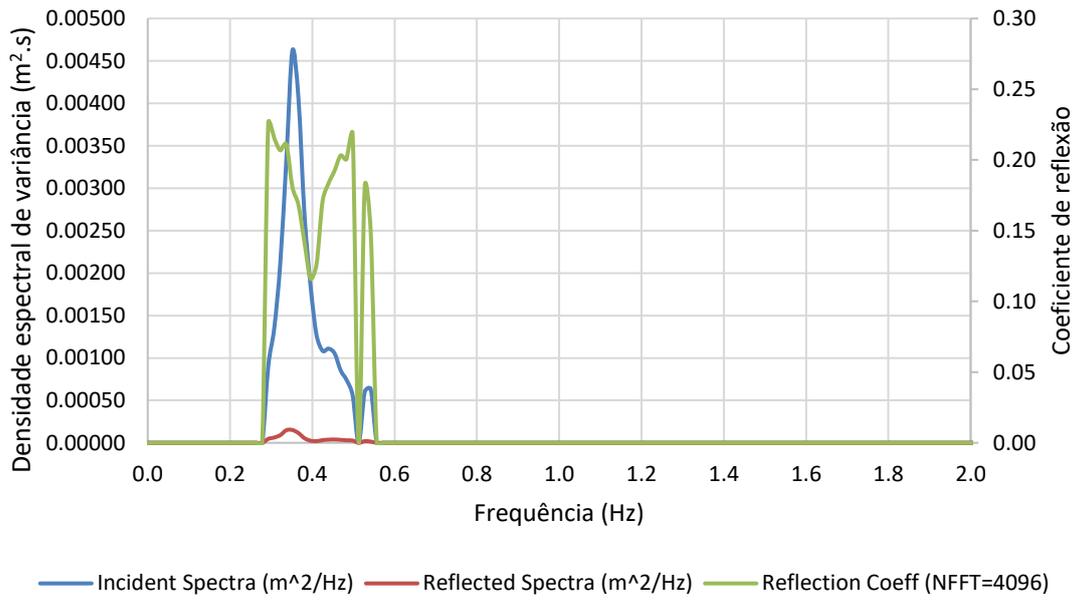


Fig. A 7 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

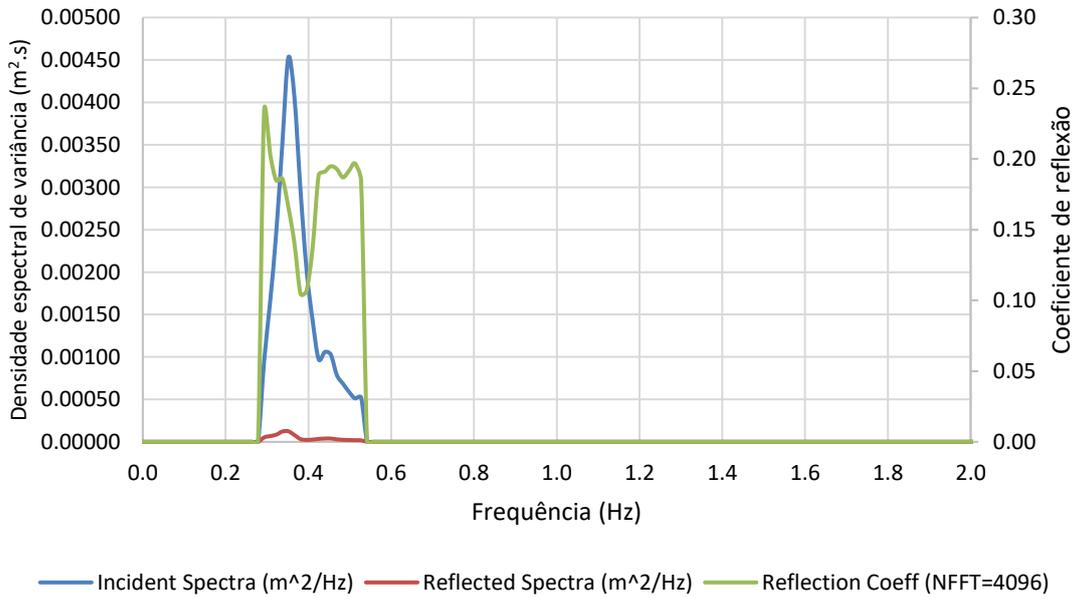


Fig. A 8 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para o modelo rugoso.

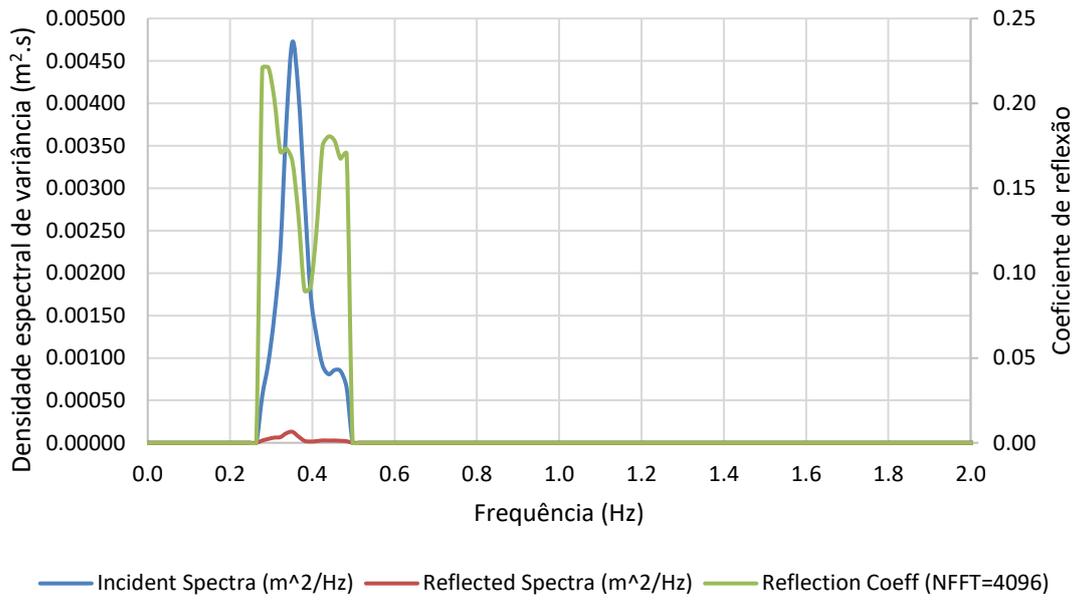


Fig. A 9 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para o modelo poroso.

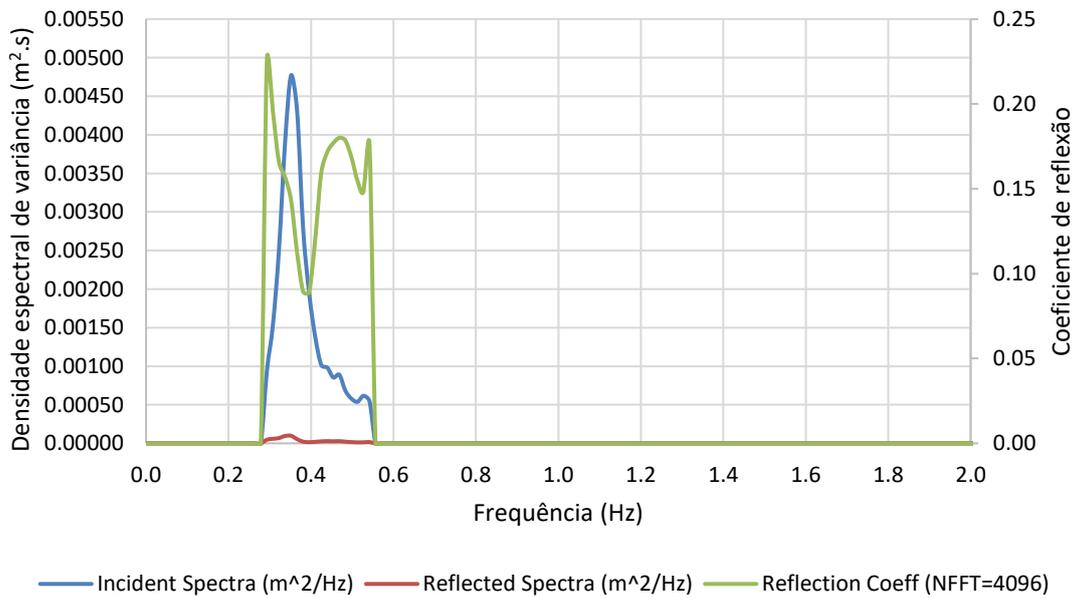


Fig. A 10 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

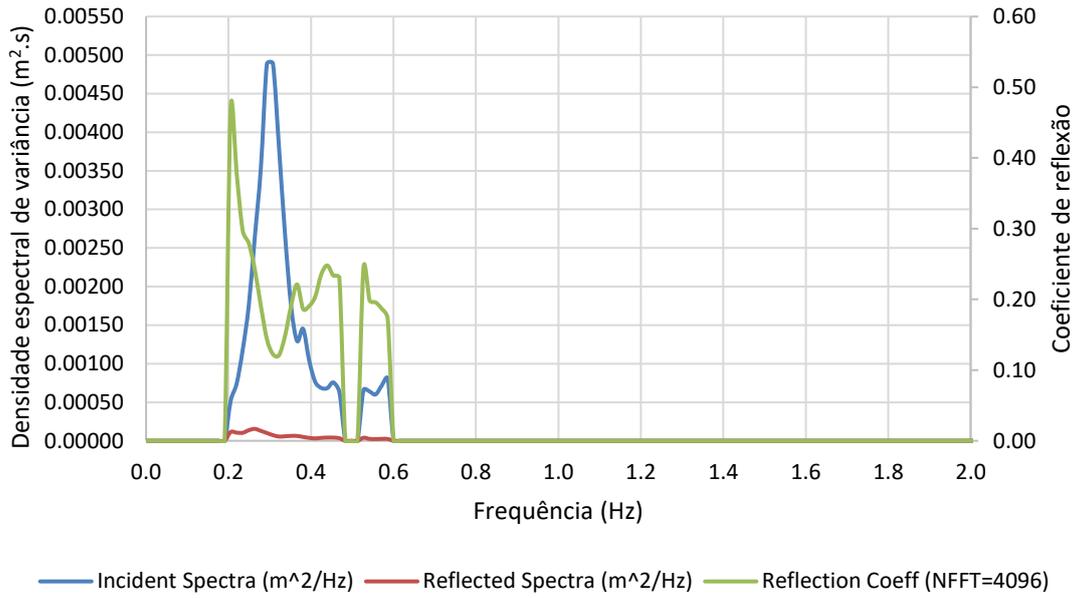


Fig. A 11 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para a praia sem bloco.

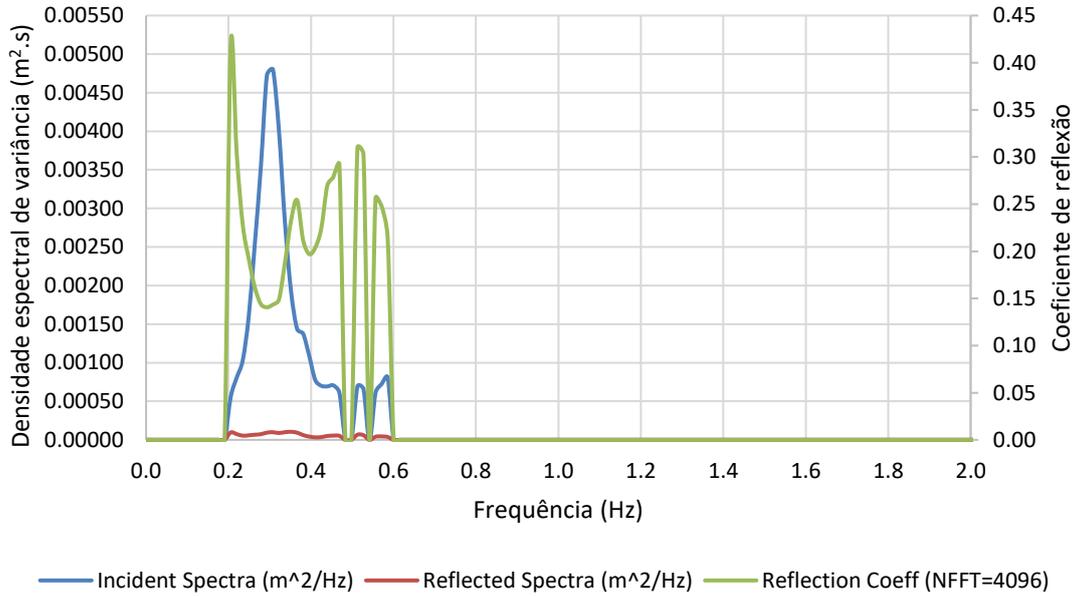


Fig. A 12 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

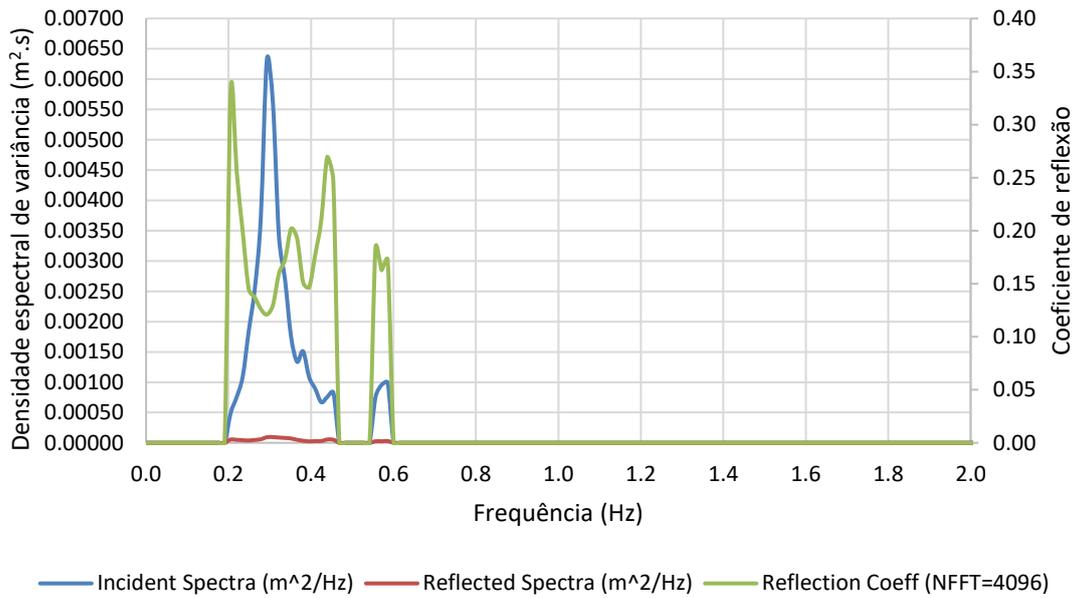


Fig. A 13 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo rugoso.

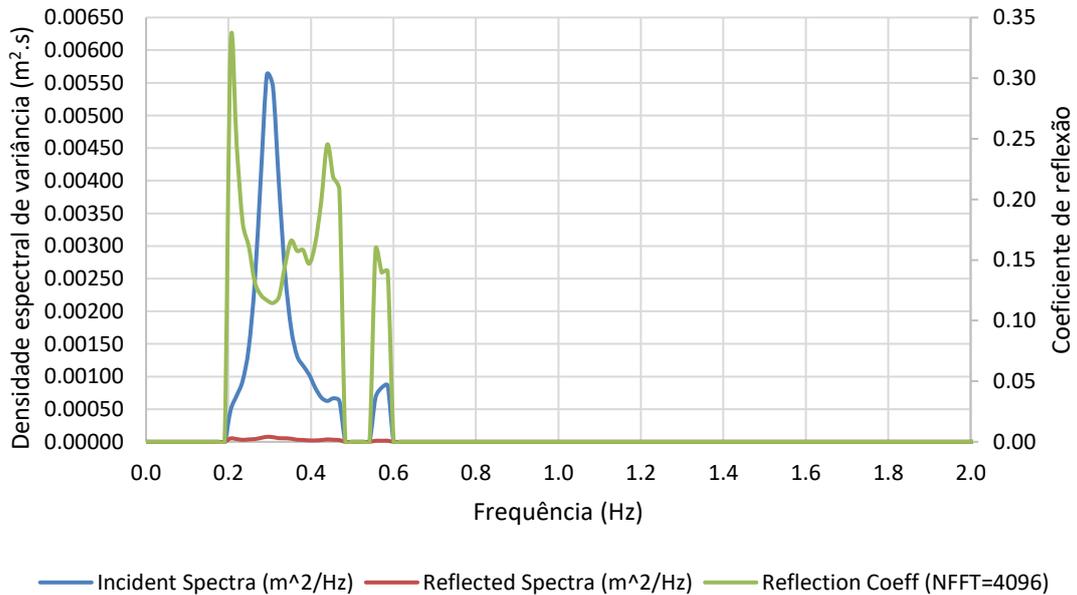


Fig. A 14 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo poroso.

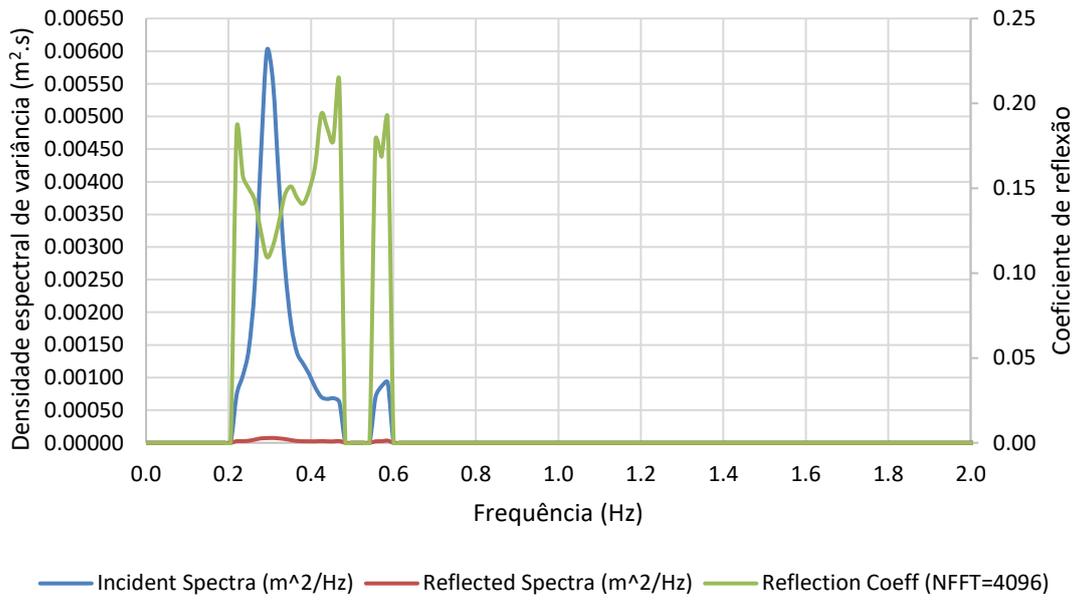


Fig. A 15 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.33$ m $T=13$ s e $H_{si}=0.10$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

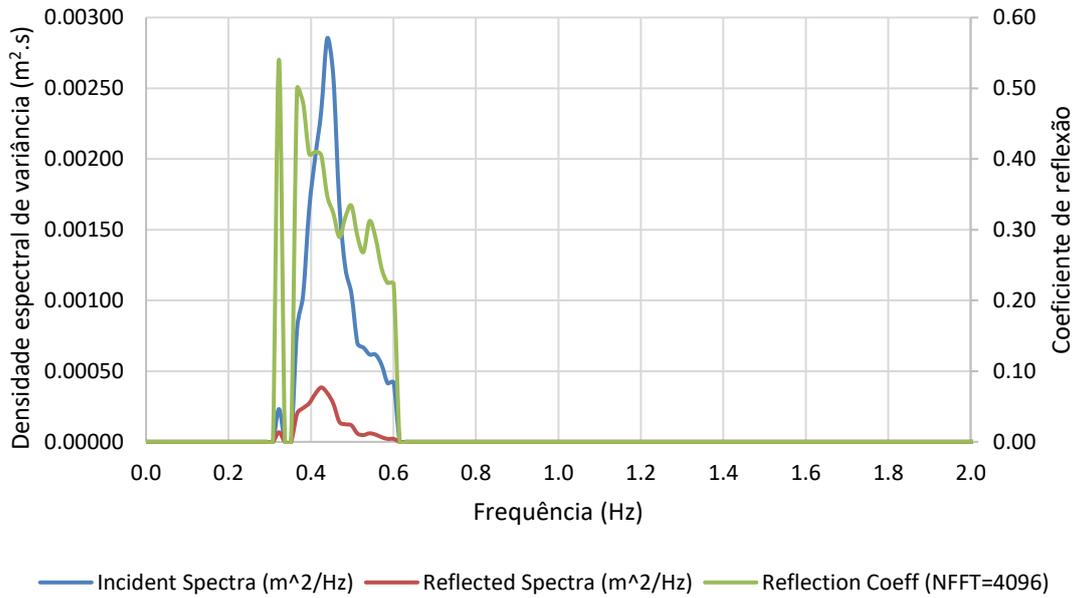


Fig. A 16 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=9$ s e $H_{si}=0.06$ m, para a praia sem bloco.

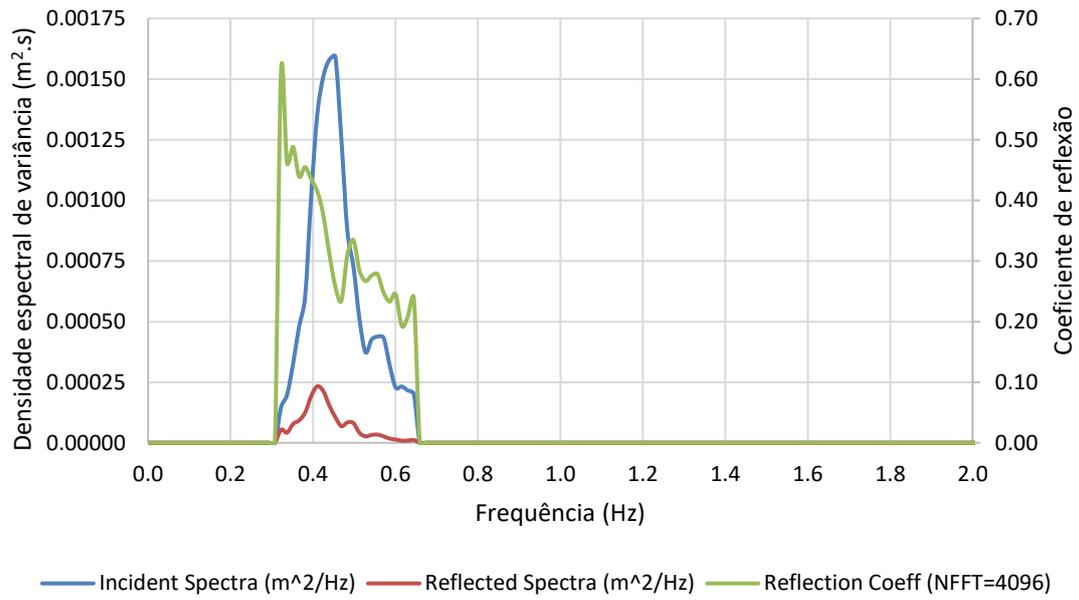


Fig. A 17 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

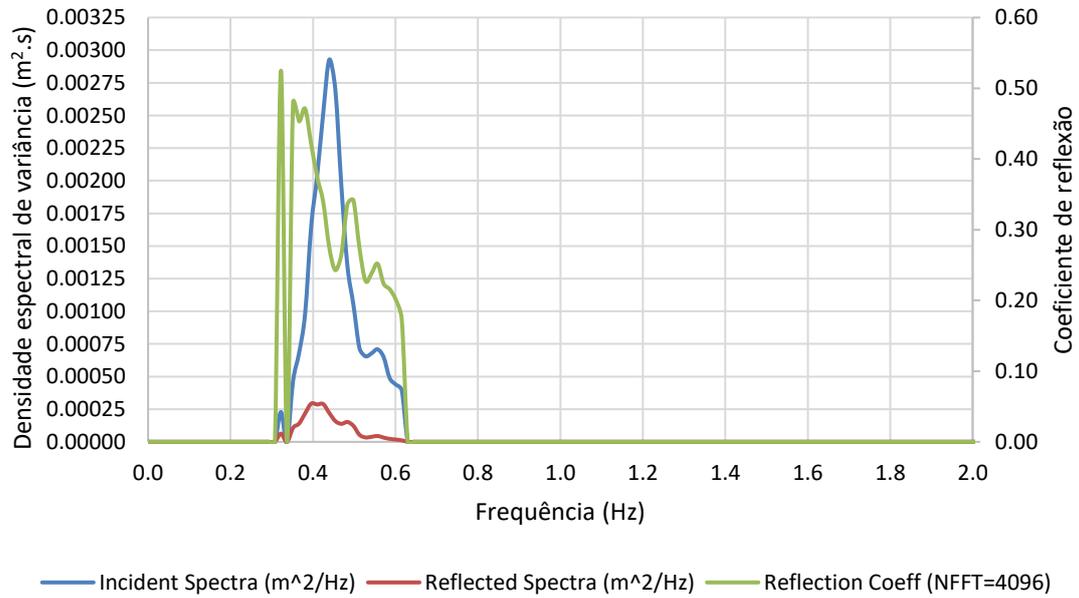


Fig. A 18 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=9$ s e $H_{si}= 0.06$ m, para o modelo rugoso.

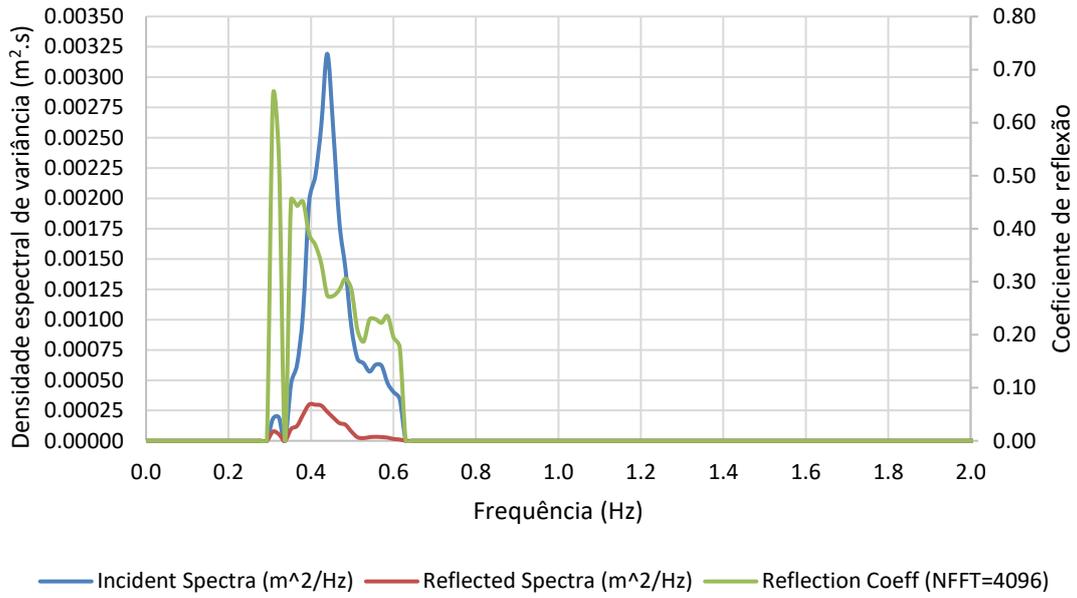


Fig. A 19 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=9$ s e $H_{si}=0.06$ m, para o modelo poroso.

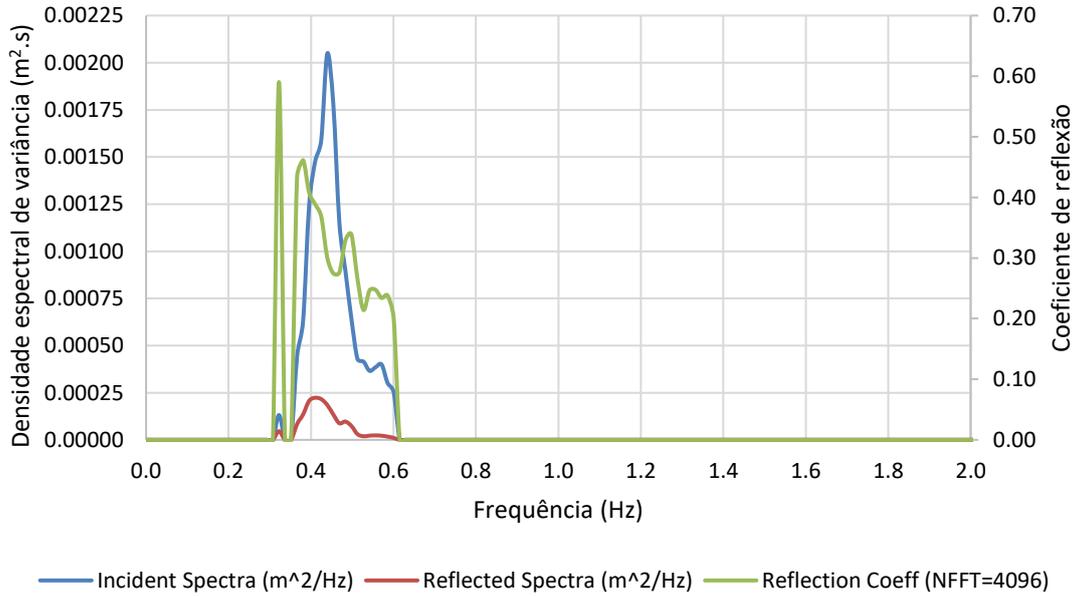


Fig. A 20 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=9$ s e $H_{si}=0.06$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

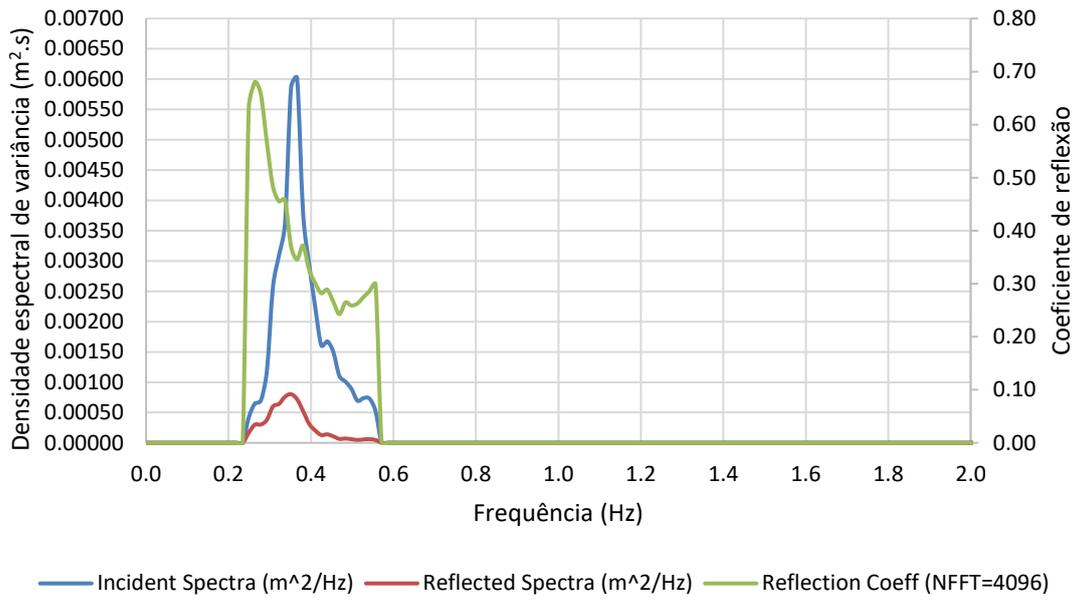


Fig. A 21 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para a praia sem bloco.

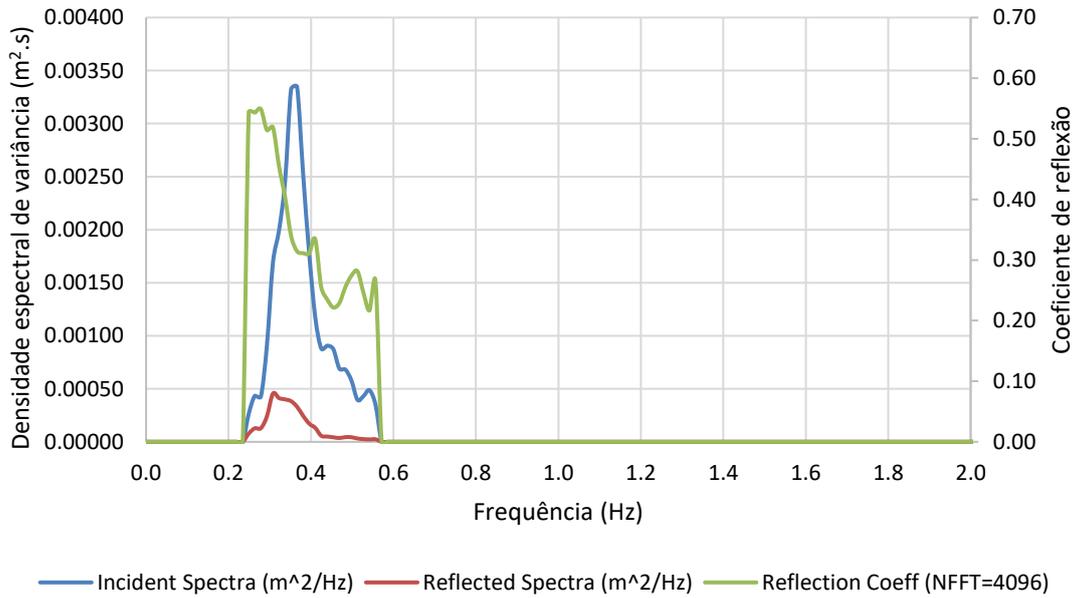


Fig. A 22 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=11$ s e $H_{si}=0.08$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

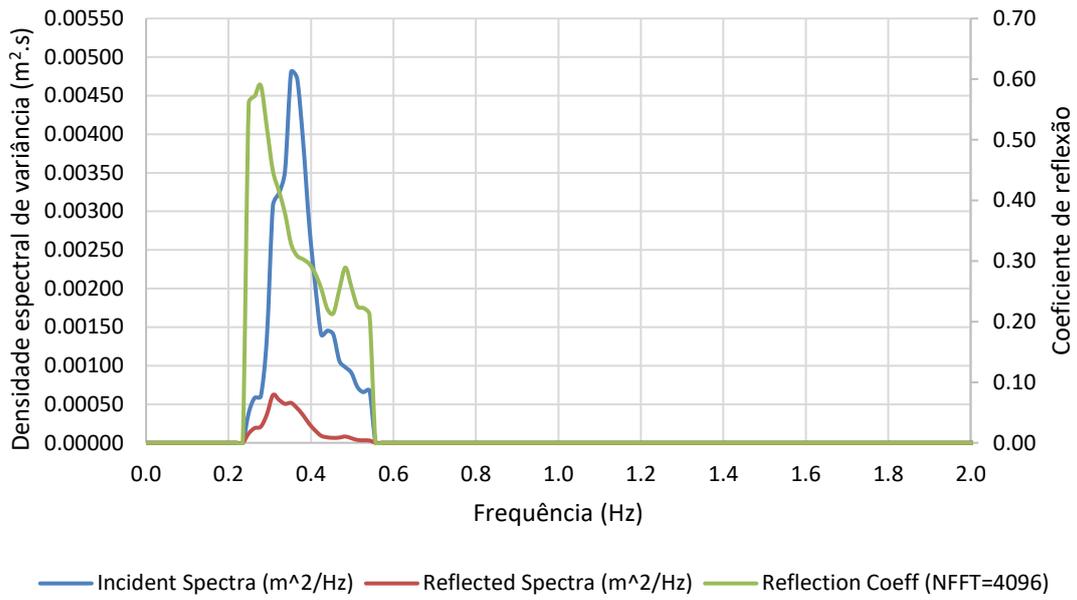


Fig. A 23 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=11$ s e $H_{si}= 0.08$ m, para o modelo rugoso.

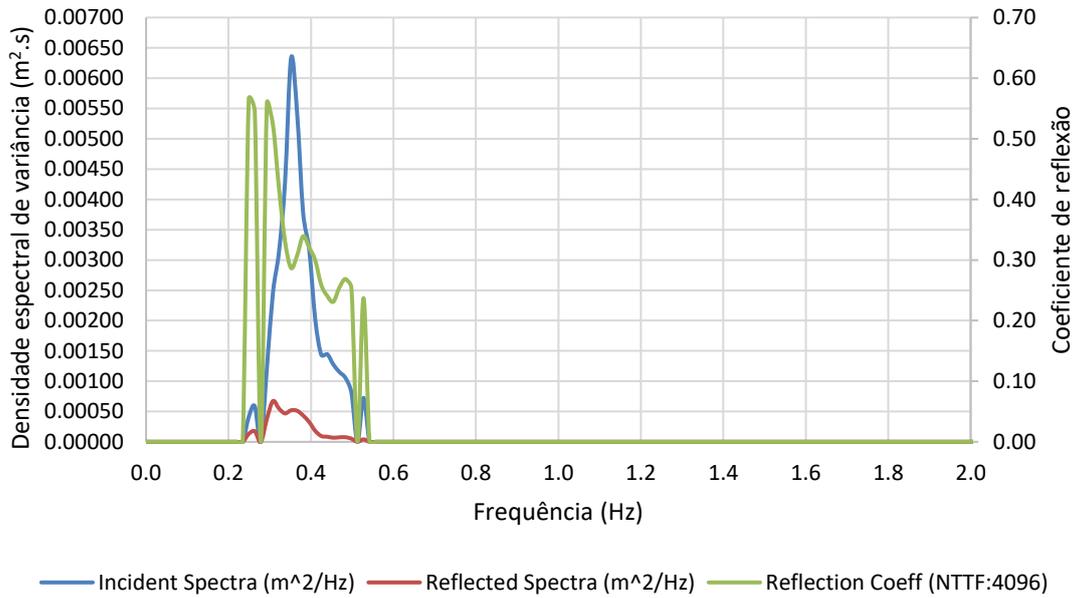


Fig. A 24 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=11$ s e $H_{si}= 0.08$ m, para o modelo poroso.

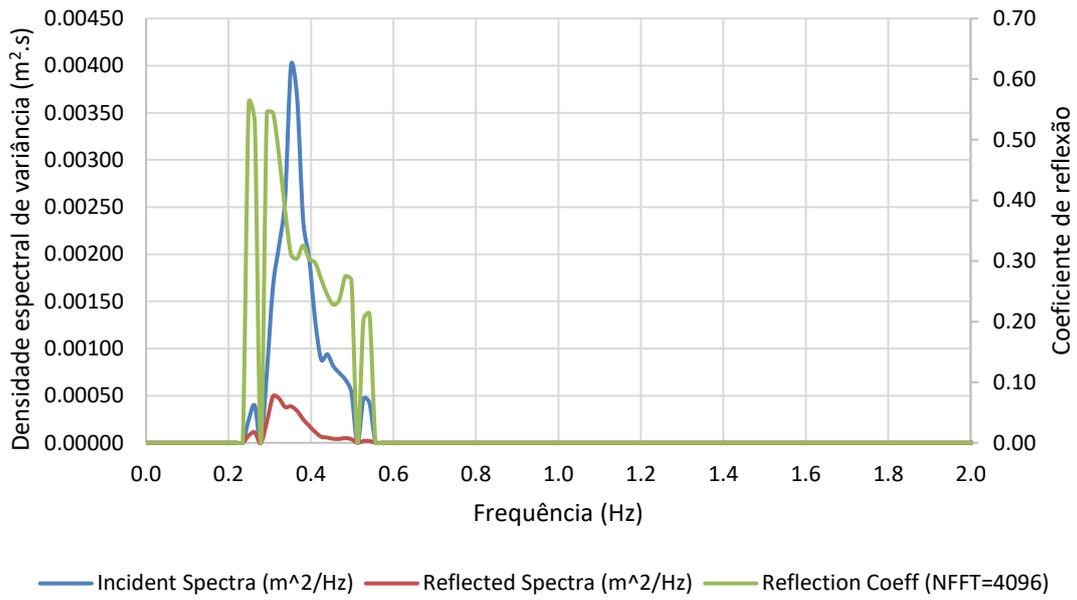


Fig. A 25 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=11$ s e $H_{si}= 0.08$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

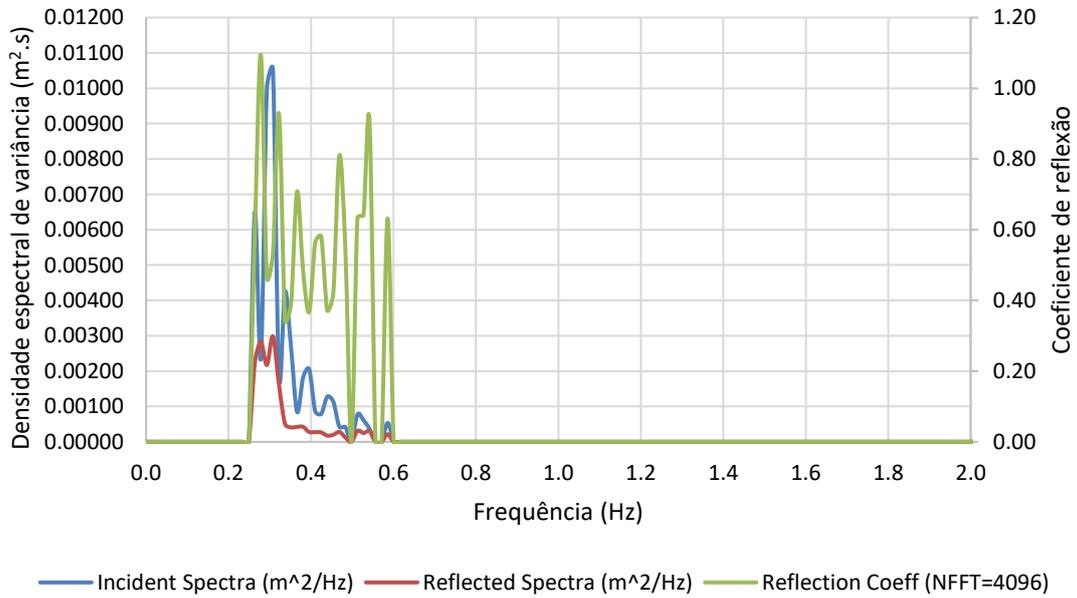


Fig. A 26 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para a praia sem bloco.

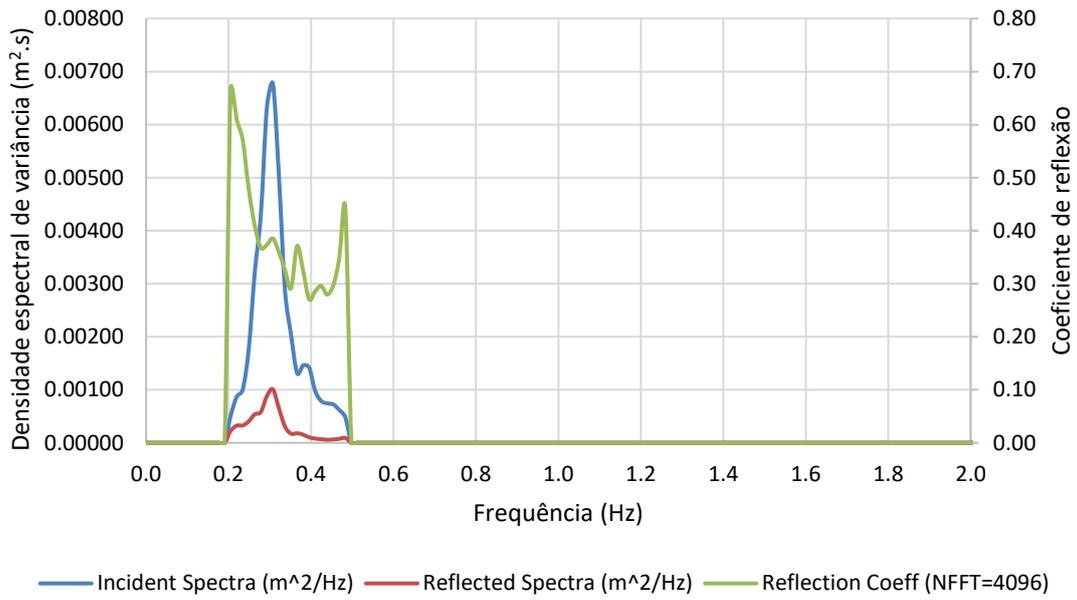


Fig. A 27 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

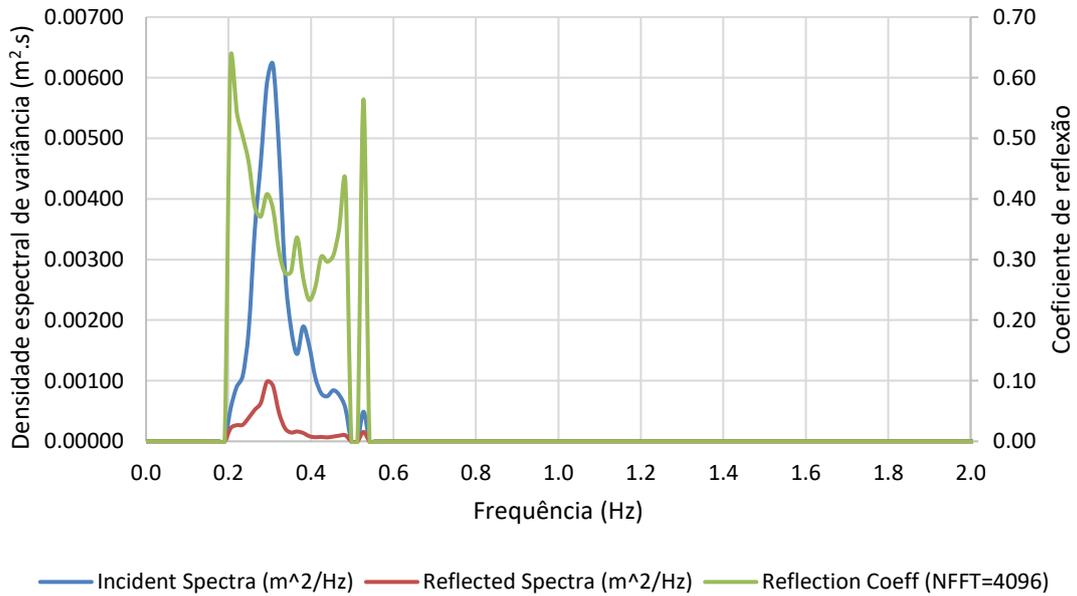


Fig. A 28 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo rugoso.

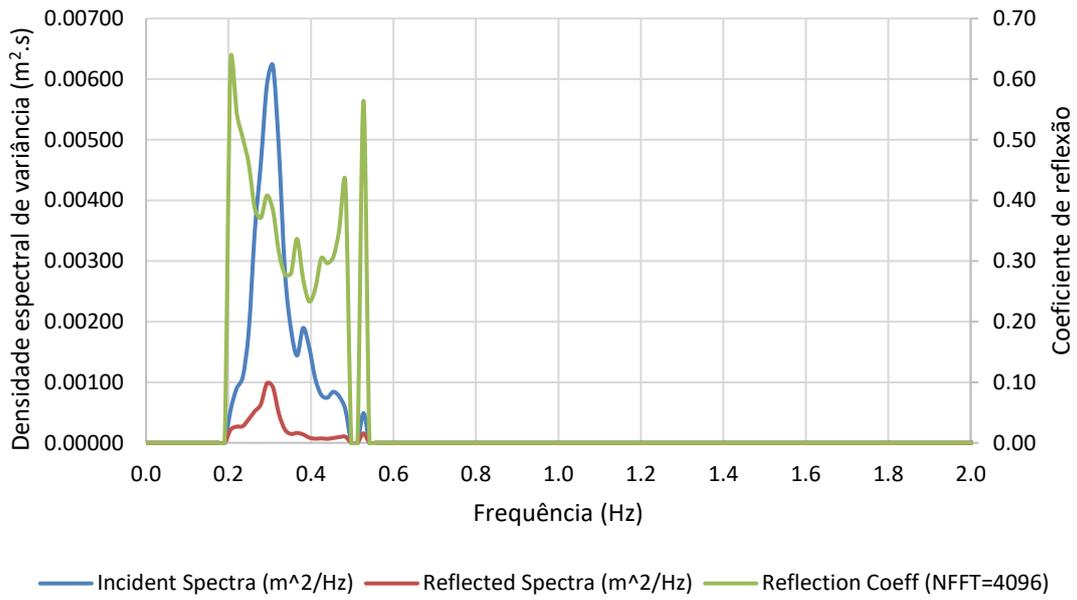


Fig. A 29 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo poroso.

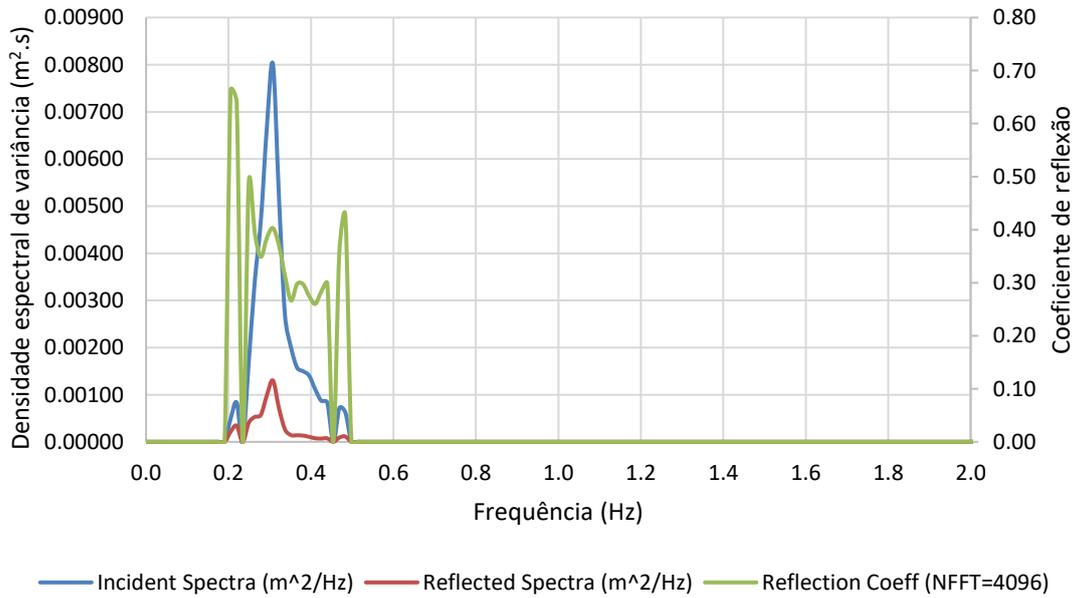


Fig. A 30 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=13$ s e $H_{si}= 0.10$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

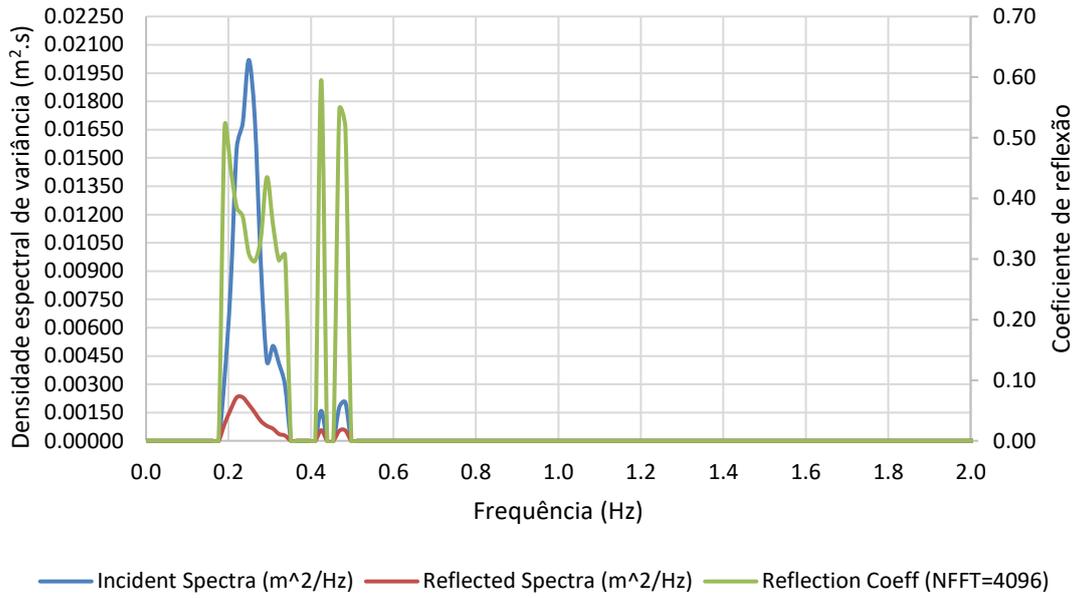


Fig. A 31 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=16$ s e $H_{si}=0.13$ m, para a praia sem bloco.

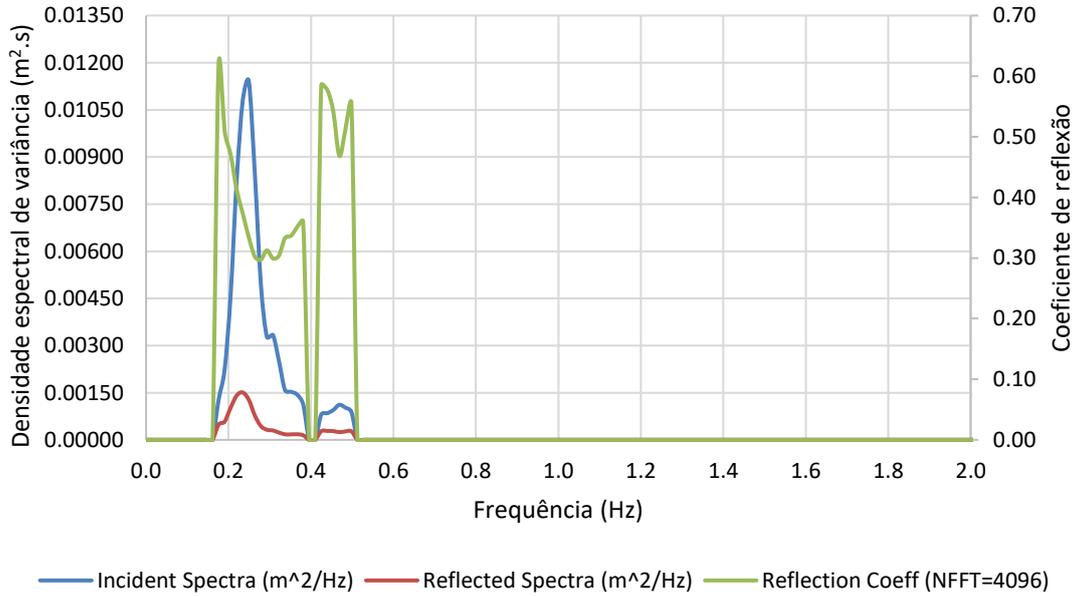


Fig. A 32 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=16$ s e $H_{si}=0.13$ m, para o modelo liso com 0.40 m.

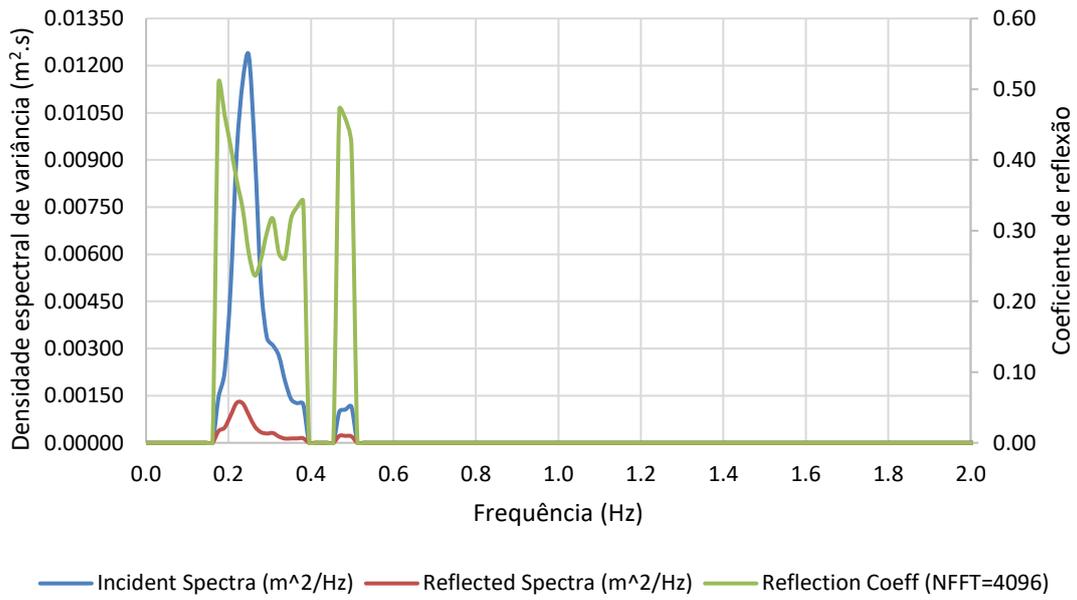


Fig. A 33 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=16$ s e $H_{si}= 0.13$ m, para o modelo rugoso.

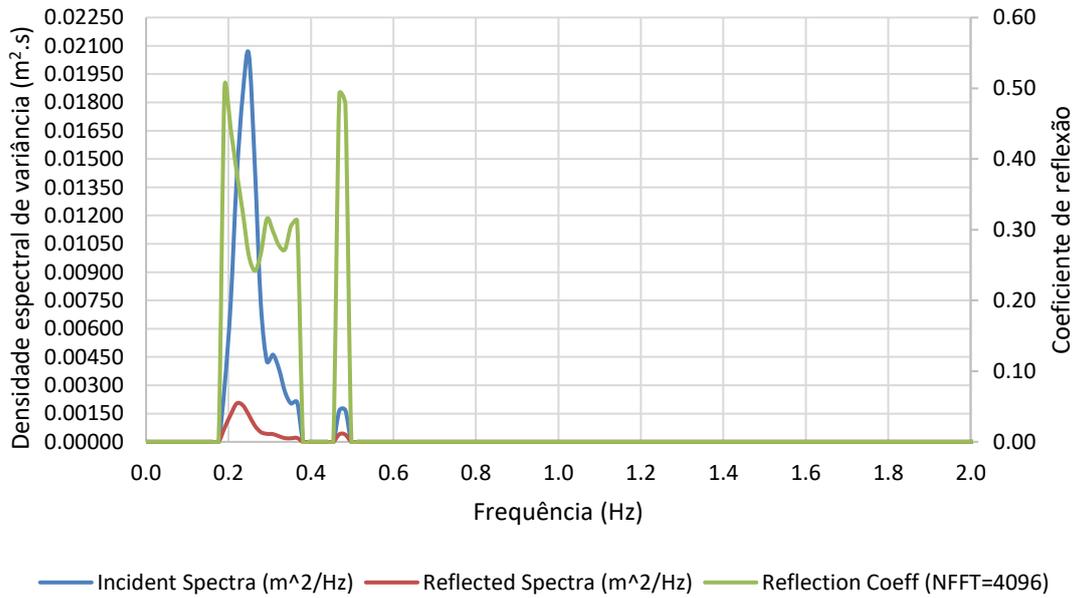


Fig. A 34 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=16$ s e $H_{si}= 0.13$ m, para o modelo poroso.

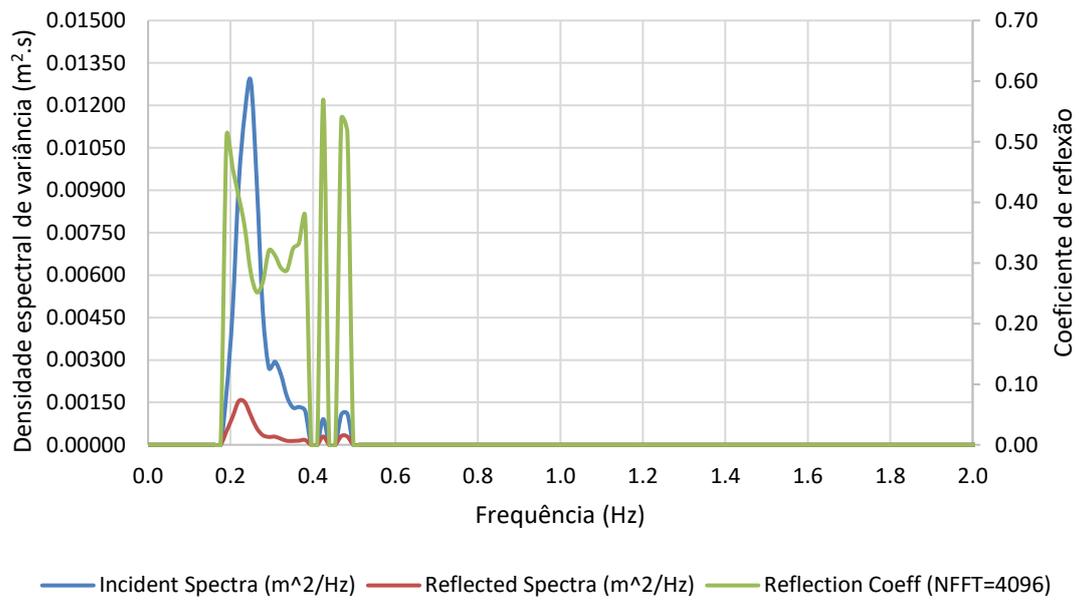


Fig. A 35 - Gráfico da análise espectral para a condição de agitação de: $d=0.60$ m $T=16$ s e $H_{si}=0.13$ m, para o modelo liso com 0.20 m.

ANEXOS B

EXEMPLOS DE IMAGENS OBTIDAS DURANTE OS ENSAIOS



Fig. B 1 - Modelo liso antes dos ensaios para o nível de BM.



Fig. B 2 - Modelo liso antes dos ensaios para o nível de BM.



Fig. B 3 Modelo liso depois dos ensaios para o nível de BM.



Fig. B 4 - Modelo liso depois dos ensaios de BM.



Fig. B 5 - Modelo liso entre ensaios para o nível de PM.



Fig. B 6 - Modelo liso e envólucra após os ensaios para o nível de PM.



Fig. B 7 - Onda a atingir o bloco para o nível de BM.

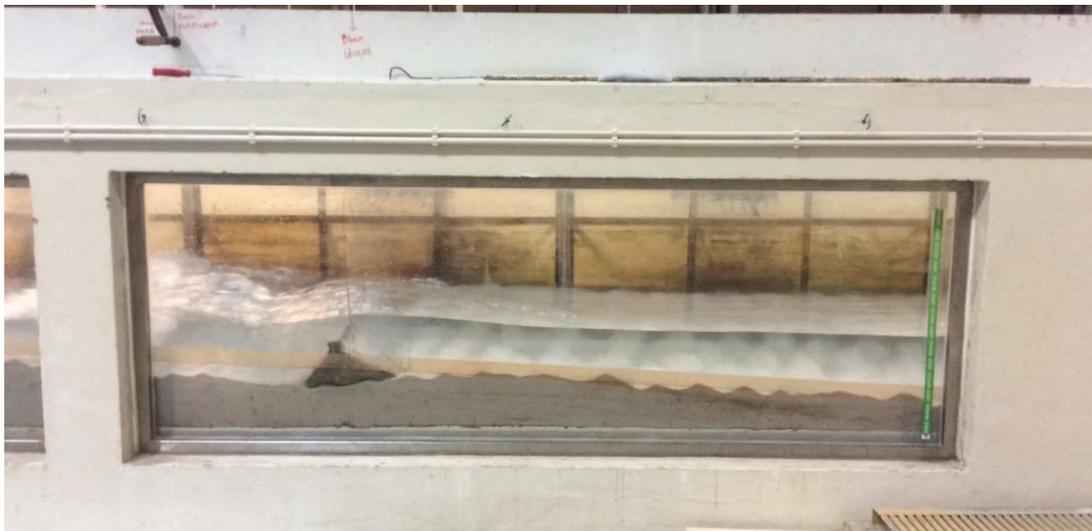


Fig. B 8 - Onda a atingir o bloco para o nível de BM.



Fig. B 9 - Movimentação de sedimentos após a passagem da onda para o nível de PM.



Fig. B 10 - Modelo rugoso antes dos ensaios.



Fig. B 11 - Modelo Rugoso, após ensaios para o nível de PM.

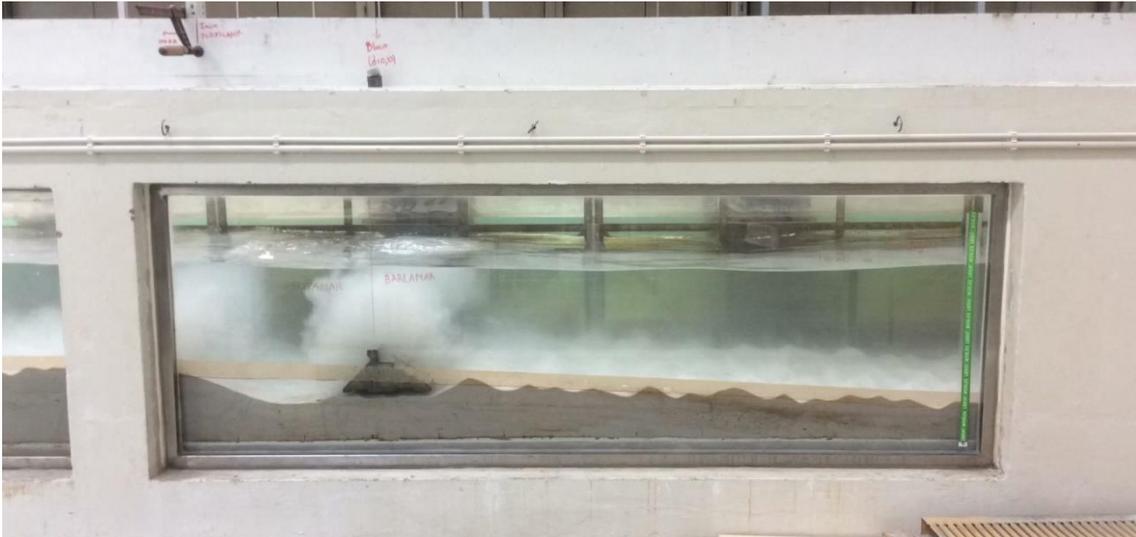


Fig. B 12 - Movimentação de sedimentos após onda atingir o bloco rugoso.

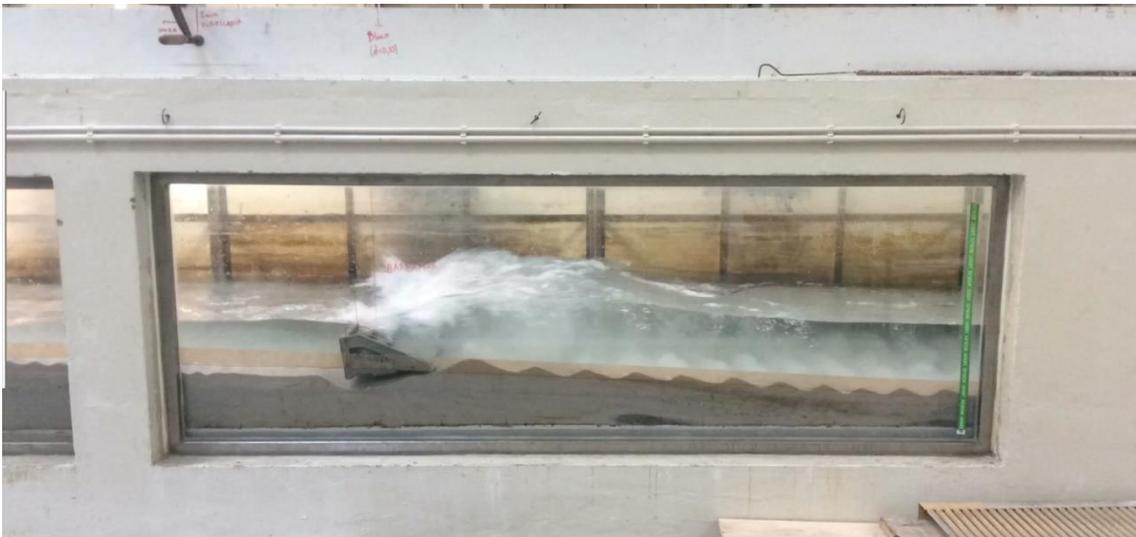


Fig. B 13 - Onda à passagem pelo modelo poroso do bloco para o nível de BM:



Fig. B 14 Efeito descarregador do bloco para o nível de BM.



Fig. B 15 Onda antes de rebentar sobre o modelo liso do bloco para o nível de BM.



Fig. B 16 - Movimentação de sedimentos em redor do modelo poroso para o nível de BM.



Fig. B 17 - Onda a atingir os blocos do modelo liso (configuração 0.20 +0.40 m), para o nível de BM.



Fig. B 18 - Modelo liso após ensaios para o nível de BM.



Fig. B 19 - Modelo liso após ensaios para o nível de BM.