

COMPORTAMENTO DE UM MANTO DE TALUDES DE ENROCAMENTO PARA DIFERENTES RISBERMAS DE PROTEÇÃO DO PÉ DE TALUDE

RICARDO JORGE DA COSTA MOREIRA DAS NEVES

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

Orientador: Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

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 - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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

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

Aos meus Pais, Irmão e Namorada

Hoje tomei a decisão de Ser Eu

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho contou com o apoio, direto e indireto, de várias pessoas que permitiram ultrapassar todos os obstáculos atingindo o objetivo pretendido. Gostaria de deixar o meu profundo sentimento de agradecimento a todos, destacando de seguida alguns.

Em primeiro lugar não posso deixar de agradecer aos meus pais, que tudo fizeram para que mesmo nas alturas mais difíceis nunca faltasse a estabilidade, o apoio e a força necessárias ao meu percurso académico. Os seus exemplos e valores nunca foram, nem serão, esquecidos servindo todos os dias como motivação para procurar fazer e ser o melhor possível. Fica aqui o meu sincero agradecimento, pois sem a sua contribuição nada seria possível. A toda a minha família e especialmente ao meu irmão, por todo o apoio demonstrado e disponibilidade para ajudar nos momentos difíceis.

Ao Professor Fernando Veloso Gomes, orientador do trabalho, pela amizade demonstrada, tendo evidenciado sempre uma disponibilidade ilimitada e um apoio incondicional ao longo de todo o decurso do trabalho contribuindo com toda a sua experiência.

À empresa Solusel pela simpatia e acessibilidade no fornecimento do enrocamento utilizado no trabalho laboratorial.

À Dona Esmeralda e Dona Paula do IHRH pela extrema simpatia e prontidão demonstradas ao longo da realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, que me apoiaram e ajudaram nas alturas difíceis, contribuindo de forma decisiva para ultrapassar os obstáculos à medida que iam surgindo. Não posso deixar de citar aqueles que partilharam comigo todas as emoções adjacentes a um estudo deste tipo.

Por fim, um especial agradecimento à minha namorada que sempre esteve do meu lado nos bons e maus momentos contribuindo com toda a sua força e apoio ajudando-me a ultrapassar esta fase da minha vida e sempre com a certeza que estará para sempre presente em toda a minha vida.

RESUMO

Este trabalho, realizado no âmbito da dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, incidiu sobre o comportamento do manto resistente em estruturas de taludes em enrocamento para diferentes risbermas de proteção do pé de talude.

As estruturas marítimas são geralmente fundadas num solo aluvionar. Estes solos estão facilmente condicionados pela agitação marítima uma vez que são constituídos por sedimentos de pequenas dimensões. A simples presença de uma estrutura altera, desde logo, as características de escoamento próximo da estrutura, nomeadamente, através de contrações do escoamento, formação de vórtices e turbulência ou fenómenos de reflexão e difração. Todos estes fatores são favoráveis ao fenómeno das erosões localizadas junto ao pé de talude de estruturas de taludes. Assim, a colocação de risbermas de proteção do pé de talude é uma das principais medidas de prevenção contra as erosões localizadas.

O estudo do fenómeno de erosão localizada mostrasse indispensável quando se aborda o comportamento das risbermas. Assim, com este trabalho pretendeu-se descrever os fenómenos envolvidos no processo erosivo. Uma vez que o fenómeno erosivo é semelhante tanto em estruturas de paredes verticais como em estruturas de taludes, mostrou-se adequado estudar este processo em ambas as estruturas, apresentando-se formulações para definição das profundidades máximas de erosão localizada.

Em complemento a este trabalho, foi realizado um trabalho laboratorial com o intuito de avaliar o comportamento do manto de taludes para diferentes risbermas de proteção do pé de talude, sendo feita uma análise qualitativa do comportamento da estrutura. Neste trabalho laboratorial foram testados dois modelos com risbermas, em que o primeiro modelo era composto por uma risberma, sendo esta o prolongamento do manto secundário. O segundo modelo, é composto com uma risberma contruída através do prolongamento do manto resistente. Para estes dois modelos foram testadas dois níveis de altura e três níveis de comprimento. No primeiro modelo as alturas ensaiadas foram de dois e três vezes o diâmetro do enrocamento da risberma. Quanto ao segundo modelo, uma vez que o diâmetro do enrocamento é superior, ensaiou-se com uma altura de risberma de uma e duas vezes o diâmetro do enrocamento. Foram ensaiados os mesmos comprimentos de risberma em ambos os modelos, nomeadamente, um, três e cinco metros. De forma a aferir as condições de ensaio foi ensaiado um modelo suplementar sem risberma de proteção do pé de talude.

Relativamente aos resultados obtidos, verificou-se um melhor comportamento do manto com a risberma com o menor diâmetro de enrocamento e comprimento superior a três metros, devido à sua flexibilidade de adaptação às erosões localizadas registadas e à baixa influência do processo erosivo junto ao pé de talude. As risbermas com cinco metros de comprimento foram as que melhores comportamentos apresentaram, no entanto, risbermas com comprimento de três metros mostraram comportamentos satisfatórios. A altura da risberma influencia a colmatação dos espaços criados entre os blocos aquando da adaptação da risberma aos fundos, sendo que a risberma com diâmetro menor e uma altura de três vezes o diâmetro do enrocamento apresentou melhores resultados.

Com isto, é recomendada a implementação de uma risberma com enrocamento do manto secundário com uma altura de três vezes o diâmetro do enrocamento e uma comprimento nunca inferior a três metros.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de Defesa Costeira, Erosão Localizada, Risberma de Proteção do Pé de Talude, Estruturas Marítimas de Paredes Verticais, Estruturas Marítimas em Taludes de Enrocamento.

ABSTRACT

This work, performed to fulfil the requirements for the Masters' degree on Civil Engineering from the Faculty of Engineering, Porto University, focused on the behaviour of rubble-mound maritime structures with different toe berm protection.

Generally, maritime structures foundations are upon alluvial soils. These soils are easily influenced by maritime actions since they are composed by small dimension sediments. The presence of a structure alters by itself the flow nearby, mainly by flow contractions, vortices and turbulence formation or reflection and diffraction phenomena. All this factors induce the scour phenomena near the rubble-mound toe. Therefore, the construction of toe berm protections is one of the main preventive strategies against the scour.

The study of the scour phenomena is indispensable when considering toe berm behaviour. With this work the phenomena related to the erosive process on vertical and rubble-mound structures are described. Since the mechanism is similar, is therefore suitable to study it on both structures, presenting formula to determinate the maximum scour depth.

To supplement this work, a laboratory work was performed with the goal of qualitatively evaluate structures' behaviours with different toe berm protections. Two toe berm protection models were tested, one prolonged from the rubble-mound secondary layer and the other from the resistant layer. For both models, two berm heights and three width levels were tested. For the first model, the tested heights were the double and triple of the rubble-mound blocks diameter. For the second model, the toe berm protection height tested was equal or double the rubble-mound blocks diameter because. In both models one, three and five meters toe berm widths were tested. A test without toe berm protection was performed to determine control results.

The best rubble-mound behaviour results were obtained with the toe berm protections with the smallest diameter and width superior to three meters due to its adaptation flexibility to the scour and to the low influence of the scour phenomena near the slope's toe. Toe berm protection five meters width presented the best behaviour, although, the one with three meters width revealed satisfactory results. Toe berm height influence the filling of the gaps between blocks when the toe berm adapts to the seabed. In this situation, the best results were obtained with the smallest blocks diameter and a height triple its diameter.

A toe berm protection prolonged from the secondary layer, with a height the triple of its blocks diameter and a width never inferior to three meters is recommended.

KEYWORDS: Coastal defence structures, Scour, Slope's toe berm protection, Vertical structures, rubble-mound structure

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.2. ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM MANTO DE TALUDES E RISBERMAS	1
1.3. OBJETIVO DA PESQUISA	3
1.4. PLANO DE PESQUISA E ESTRUTURA DO RELATÓRIO	4
2. EROSÃO LOCALIZADA	5
2.1. QUEBRAMARES DE PAREDES VERTICAIS	9
2.2. QUEBRAMARES DE TALUDES EM ENROCAMENTO	10
2.3. PREVISÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROSÃO – MÉTODOS TEÓRICOS E SEMI-EMPÍRICOS	12
2.3.1. QUEBRAMARES DE PAREDES VERTICAIS	12
2.3.2. QUEBRAMARES DE TALUDES	20
2.4. PREVISÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROSÃO – MÉTODOS PROBABILÍSTICOS	29
2.5. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO	30
2.6. INFLUÊNCIA DOS FUNDOS NO QUEBRAMAR	31
2.7. EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS FOSSAS DE EROSÃO	32
2.8. SOLUÇÕES ESTRUTURAIS AO NÍVEL DAS RISBERMAS	34
2.9. DIMENSIONAMENTO DE RISBERMA	38
2.10. LIGAÇÃO AO CASO EM ESTUDO	41
3. MODELO	43
3.1. SEMELHANÇA DE ESCALAS	43
3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS – CONCEÇÃO	45

3.3. PROGRAMA DE ENSAIOS	46
3.4. EQUIPAMENTO E MONITORIZAÇÃO	48
3.5. PROCEDIMENTO	51
4. RESULTADOS E ANÁLISE	53
4.1. TESTES	53
4.1.1. SÉRIE DE ENSAIOS 0 – TESTES DE AFERIÇÃO DE MODELO	53
4.1.2. SÉRIE DE ENSAIOS 1.....	66
4.1.3. SÉRIE DE ENSAIOS 2.....	76
4.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	84
4.3. VALIDADE DOS RESULTADOS E PROBLEMAS	85
4.4. RELAÇÕES QUALITATIVAS	88
4.4.1. ANÁLISE DO DIÂMETRO DO ENROCAMENTO.....	88
4.4.2. ANÁLISE DO NÚMERO DE FIADAS	89
4.4.3. ANÁLISE DO COMPRIMENTO	90
4.5. RELAÇÕES QUANTITATIVAS	90
5. CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	93
5.1. CONCLUSÕES.....	93
5.2. RECOMENDAÇÕES	94
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	95
BIBLIOGRAFIA	97
ANEXOS	99
ANEXO A	101
ANEXO B	105
ANEXO C	111
ANEXO D	117
ANEXO E	121
ANEXO F.....	126
ANEXO G.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esporão com forma em planta do tipo S e agrupamento de esporões	2
Figura 2 – Quebramar destacado da barra do Douro	2
Figura 3 – Exemplo da aplicação do sistema Rip-Rap	3
Figura 4 – Curva de Shields	7
Figura 5 – Evolução dos fundo sujeitos à ação de ondas estacionárias. (Sumer e Fredsøe, 2000) ...	10
Figura 6 – Perfil de equilíbrio erosões/deposições – quebramar vertical (Sumer e Fredsøe, 2000) ...	10
Figura 7 – Perfil de equilíbrio erosão/deposição – quebramar em taludes (Sumer e Fredsøe, 2000) .	11
Figura 8 – escoamento junto à cabeça de uma quebramar vertical (Sumer e Fredsøe, 1997)	13
Figura 9 – Profundidade máxima de erosão junto a uma quebramar (Sumer e Fredsøe, 2000)	15
Figura 10 – Previsão da profundidade máxima de erosão junto a um quebramar vertical (CEM)	17
Figura 11 – Variação de X/X_b com H_s/L e S/H_0 (Sutherland et. al., 2003)	19
Figura 12 – Profundidade relativa de erosão $S_m/(H_m)_0$ em função de $h/(L_p)_0$ (CEM)	20
Figura 13 – Profundidade máxima de erosão e deposição (Fredsøe e Sumer, 1997)	21
Figura 14 – Profundidade máxima de erosão a barlar (Fredsøe e Sumer, 1997)	22
Figura 15 – Perfis tipos dos fundos para diferentes valores de h/L (Fredsøe e Sumer, 1997)	23
Figura 16 – Profundidade máxima de erosão (Sumer e Fredsøe, 2000)	25
Figura 17 – Perfis dos fundos num quebramar de taludes (Sumer e Fredsøe, 2000)	31
Figura 18 – Evolução temporal da profundidade máxima de erosão (Sumer e Fredsøe, 2000)	33
Figura 19 – Forma de colocação do enrocamento em obras marítimas em taludes	34
Figura 20 – Profundidade máxima de erosão em função do comprimento da risberma	36
Figura 21 – Estado de equilíbrio da risberma após deslizamento do enrocamento	36
Figura 22 – Comparação do perfil de equilíbrio da risberma para diferentes formas de fundo	37
Figura 23 – Influência do número de camadas da risberma N na sua funcionalidade	37
Figura 24 – Técnicas construtivas de risbermas em estruturas marítimas aderentes (CEM)	38
Figura 25 – Estabilidade da risberma em função da relação ht/h	39
Figura 26 – Estabilidade da risberma de proteção	40
Figura 27 – Perfil-tipo dos ensaios laboratoriais	41
Figura 28 – Aplicabilidade dos critérios de semelhança de escalas	44
Figura 29 – Ilustração do formato do código atribuído aos ensaios	46
Figura 30 – Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	48
Figura 31 – Amplitude de onda registada pelas sondas de nível hidrodinâmico	49

Figura 32 – Disposição das sondas no canal e softwares de registo e controlo das sondas.....	50
Figura 33 – Cabine de controlo do grupo gerador de ondas e sondas de nível hidrodinâmico.....	50
Figura 34 – Perfil no início e no decorrer do ensaio 0,1.....	55
Figura 35 – Perfil do fundo próximo ao pé de talude durante o ensaio 0.3	56
Figura 36 – Perfil do fundo durante o ensaio 0.3	57
Figura 37 – Perfil do fundo no final do ensaio 0.4.....	58
Figura 38 – Erosões no pé de talude e acumulação de areia imediatamente a seguir à estrutura.....	59
Figura 39 – Rebentação de ondas junto à pá geradora de ondas.....	60
Figura 40 – Perfil do fundo no final do ensaio 0.8.....	61
Figura 41 – Perfil do fundo (à esquerda) e tardoz da estrutura (à direita).....	62
Figura 42 – Perfil do fundo durante o ensaio 0.10	63
Figura 43 – Perfil do fundo, blocos deslocados e removido do manto no ensaio 0.11.....	64
Figura 44 – Perfil do fundo (à esquerda) e blocos removidos e deslocados do manto (à direita).....	66
Figura 45 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 0 (dimensões em cm)	66
Figura 46 – Perfil tipo da série de ensaios 1	67
Figura 47 – Perfil dos fundos e deslocamento da risberma e assentamento do coroamento.....	73
Figura 48 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.1 (dimensões em cm)	68
Figura 49 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma do ensaio 1.2.1.....	68
Figura 50 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.3 (dimensões em cm)	70
Figura 51 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.2.3.....	70
Figura 52 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.5 (dimensões em cm)	71
Figura 53 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.2.5.....	71
Figura 54 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.1 (dimensões em cm)	72
Figura 55 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.3 (dimensões em cm)	74
Figura 56 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.3.3.....	74
Figura 57 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.5 (dimensões em cm)	75
Figura 58 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma do ensaio 1.3.5.....	75
Figura 59 – Perfil tipo da série de ensaios 2	76
Figura 60 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.1 (dimensões em cm)	77
Figura 61 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.1.....	77
Figura 62 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.1 (dimensões em cm)	78
Figura 63 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.2.1.....	79
Figura 64 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.3.....	80

Figura 65 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.3 (dimensões em cm)	80
Figura 66 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.3 (dimensões em cm)	81
Figura 67 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.2.3.....	82
Figura 68 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.5 (dimensões em cm)	83
Figura 69 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.5.....	83
Figura 70 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.5 (dimensões em cm)	84
Figura 71 – Deposição de sedimento na zona de transição manto/risberma no ensaio 1.2.5.....	89
Figura 72 – Exemplo da erosão verificada na zona de transição manto/risberma no ensaio 2.2.3	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Legenda da Figura 9 com descrição das características dos ensaios correspondentes ...	15
Tabela 2 – Previsão da profundidade máxima de erosão através da fórmula 20	24
Tabela 3 – Previsão da profundidade máxima de erosão através das fórmulas 21 e 22.....	26
Tabela 4 – Resumo da Formulação para a previsão da profundidade máxima de erosão.....	27
Tabela 5 – Análise da escala de tempo adimensional T* (Sumer e Fredsøe, 2000)	33
Tabela 6 – Principais critérios de semelhança de Froude	45
Tabela 7 – Programa de Ensaios.....	47
Tabela 8 – Características da agitação marítima, inclinação dos fundos e tempo de ensaio	47
Tabela 9 – Principais características da série de ensaios 0	54
Tabela 10 – Característica do ensaio 0.1	54
Tabela 11 – Características do ensaio 0.2.....	55
Tabela 12 – Características do ensaio 0.3.....	56
Tabela 13 – Características do ensaio 0.4.....	57
Tabela 14 – Características do ensaio 0.5.....	58
Tabela 15 – Características do ensaio 0.6.....	59
Tabela 16 – Características do ensaio 0.7.....	60
Tabela 17 – Características do ensaio 0.8.....	61
Tabela 18 – Características do ensaio 0.9.....	62
Tabela 19 – Características do ensaio 0.10.....	63
Tabela 20 – Características do ensaio 0.11.....	63
Tabela 21 – Características do ensaio 0.12.....	64
Tabela 22 – Características do ensaio 0.13.....	65
Tabela 23 – Principais características da série de ensaios 1	67
Tabela 24 – Características do ensaio 1.2.1.....	67
Tabela 25 – Características do ensaio 1.2.3.....	69
Tabela 26 – Características do ensaio 1.2.5.....	70
Tabela 27 – Características do ensaio 1.3.1.....	72
Tabela 28 – Características do ensaio 1.3.3.....	73
Tabela 29 – Características do ensaio 1.3.5.....	74
Tabela 30 – Principais características da série de ensaios 2	76
Tabela 31 – Características do ensaio 2.1.1.....	76

Tabela 32 – Características do ensaio 2.2.1	78
Tabela 33 – Características do ensaio 2.1.3	79
Tabela 34 – Características do ensaio 2.2.3	81
Tabela 35 – Características do ensaio 2.1.5	82
Tabela 36 – Características do ensaio 2.2.5	83
Tabela 37 – Análise da altura de onda, período e profundidade de erosão	85
Tabela 38 – Valores de KD segundo o SPM (1984)	87
Tabela 39 – Valores da profundidade máxima de erosão no perfil retirado no vidro do tanque	90
Tabela 40 – Valores da velocidade junto ao leito das 4 Beams do ADV (dimensões em m/s)	91
Tabela 41 – Previsão da profundidade máxima de erosão pela aplicação da fórmula 13	91

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

a – amplitude do movimento orbital das partículas da água

A – altura de onda junto à estrutura

cm – centímetros

B – diâmetro da cabeça do quebramar

C_D – coeficiente de dragagem dos sedimentos

C_u – coeficiente de incerteza com valor médio igual à unidade

D – altura de deposição de sedimentos

d – diâmetro dos sedimentos

d_{50} – diâmetro médio dos sedimentos

D_{n50} – comprimento da aresta de um cubo com o mesmo peso que os blocos da risberma de proteção ou diâmetro equivalente

$E[y(x)|x>x_1/n]$ – valor médio esperado para a profundidade do fosso erosivo devido à acção das n maiores ondas incidentes

g – aceleração da gravidade

H – altura de onda incidente

h – profundidade de água

H_0 – altura de onda ao largo

$H_{2\%}$ – altura de onda excedida por 2% das ondas

H_d – altura de onda de dimensionamento

H_{max} – altura de onda máxima

H_{m0} – altura de onda associada ao momento espectral de ordem 0

H_s – altura de onda significativa ou média do terço superior das alturas de onda

h_s – profundidade de água acima da risberma

Hz – Hertz

I_r – número de Iribarren

k_p – número de onda associado a uma período de pico

KC – número de Keulegan-Carpenter

K_D – coeficiente de estabilidade

K_{Δ} – coeficiente de forma

K_r – coeficiente de reflexão

l – comprimento da risberma de proteção

L – comprimento de onda, largura da fossa de erosão

- L_0 – comprimento de onda associado a um período de onda espectral
 m – metros, inclinação do talude
 M_{50} – massa relativa dada por 50% da curva de distribuição da massa
 $\max(\tau_0)$ – tensão máxima de arrastamento
 n – número de ondas consideradas no estudo dos fenômenos erosivos
 N – número de camadas da risberma
 N_L – escala de comprimento ou geométrica
 N_{od} – número de blocos deslocados por unidade de espessura D_n
 N_s – parâmetro de estabilidade
 N_t – escala de tempo
 N_u – escala de velocidade
 $p(x)$ - função densidade de probabilidade x
 Re – número de Reynolds
 S – profundidade do fosso erosivo
 s – relação entre a massa volúmica dos sedimentos e a massa volúmica da água
 s – segundos
 S_m – profundidade máxima do fosso erosivo
 t – intervalo de tempo
 T – período de onda
 t – toneladas
 T^* – escala de tempo adimensional
 T_p – período de pico
 T_s – escala temporal
 U_{cr}^* – velocidade de atrito crítica
 U_m – velocidade orbital máxima junto ao leito
 u_{rms} – raiz média quadrática da velocidade orbital junto ao leito
 V – volts
 W – peso dos blocos
 x – abcissa genérica
 X – distância horizontal da linha de costa à estrutura
 X_b – distância horizontal da linha de costa à zona de rebentação
 Z – cota genérica

α – inclinação do talude
 α – fator de ampliação da tensão de arrastamento
 γ – peso volúmico do fluido
 γ_r – peso volúmico do enrocamento
 γ_s – peso volúmico dos sedimentos
 Δ – densidade relativa ($s - 1$)
 θ – parâmetro de Shields
 θ_{cr} – parâmetro de Shields crítico
 ρ – massa volúmica da água
 ρ_r – peso volúmico do enrocamento
 ρ_s – massa volúmica dos sedimentos
 σ – desvio padrão
 τ – tensão de arrastamento natural
 τ_0 – tensão de arrastamento nas proximidades da estrutura
 τ_{cr} – tensão crítica de arrastamento
 ν – viscosidade cinemática da água
 ω – frequência de onda

Acrónimos

2D – duas dimensões
3D – três dimensões
ADV – Acoustic Doppler Velocimeter
CEM – Coastal Engineering Manual
CIRIA – Construction Industry Research and Information Association
DH – Delft Hydraulics
DHI – Danish Hydraulics Institute
EUA – Estados Unidos da América
PM – preia-mar
SPM – Shore Protection Manual
TOT – enrocamento de todo o tamanho
UK – Reino Unido
Z.H. – Zero Hidrográfico

1 INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

O fenómeno de erosão localizada ocorre junto a estruturas marítimas representando uma das principais causas de instabilidade. Contudo, a erosão localizada pode conjugar-se com uma erosão global. A erosão global está associada à interação da plataforma continental com a agitação marítima. As zonas costeiras devem ser preservadas devido ao seu valor estético e ecológico e para além disso verifica-se uma maior densidade populacional no litoral do que no interior. Devido aos mecanismos hidrodinâmicos, a previsão da evolução da linha de costa revela-se de difícil compreensão e a erosão global tem-se verificado bastante ativa daí que, a construção de estruturas de forma a mitigar estes problemas tem-se verificado uma solução recorrente. A erosão global deve-se principalmente a fenómenos naturais, no entanto verificam-se que algumas intervenções humanas agravam este fenómeno. O agravamento deste processo conjugado com a crescente ocupação do litoral tem alertado a comunidade da engenharia costeira para a procura de soluções para combater este problema.

Este fenómeno erosivo verifica-se tanto em meio fluvial como em meio marítimo, verificando-se mais ativa no último. Isto deve-se aos mecanismos hidrodinâmicos que lhe estão associado pois estes são, geralmente, mais exigentes no meio marítimo.

1.2. ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM MANTO DE TALUDES E RISBERMAS

As estruturas marítimas podem assumir uma forma vertical ou em taludes. A definição da sua forma está geralmente relacionada com as condições de implantação, função, características hidrodinâmicas e custo de construção. As estruturas verticais não possuem a flexibilidade das estruturas em manto de taludes, ou seja, as estruturas verticais são mais suscetíveis às alterações dos fundos provocada pela agitação marítima. Outro aspeto que difere estas duas estruturas passa pela forma de dissipação de energia onde nas estruturas verticais a dissipação de energia é muito reduzida existindo um coeficiente de reflexão elevado. Por isso, as estruturas em manto de taludes mostram-se uma solução mais adequada para obras de proteção costeira. Diversas estruturas marítimas podem assumir uma forma em talude sendo que os esporões, quebramares e estruturas longitudinais aderentes (paredão) são as estruturas mais comuns que assumem esta forma.

Os esporões são estruturas geralmente perpendiculares à linha de costa e que está nela enraizada. A sua principal função é permitir a retenção de sedimentos em zonas onde a erosão se verifica bastante ativa, criando assim um plano de praia (Veloso Gomes, 2013). Nos últimos anos novas formas em planta de esporão têm sido aplicadas (L, S ou Z) verificando-se em alguns casos uma maior eficácia na retenção de sedimentos, exemplo disso é o caso do esporão da praia de Espinho, Figura 1. Para que esta situação

se verifique torna-se necessário que exista um transporte litoral de sólidos dominante, ou seja, que a retenção de sedimentos junto ao esporão seja eficaz pois, caso isto não se suceda, o esporão perde as suas principais funções. No entanto, a alimentação artificial pode contornar este problema, contudo em caso de uma zona onde a agitação marítima se verifique bastante forte esta solução deixa de ser viável. Quando a zona a proteger é extensa um único esporão pode não ser eficaz pelo que, geralmente, é aplicado um agrupamento deste tipo de estruturas, Figura 1 - direita.

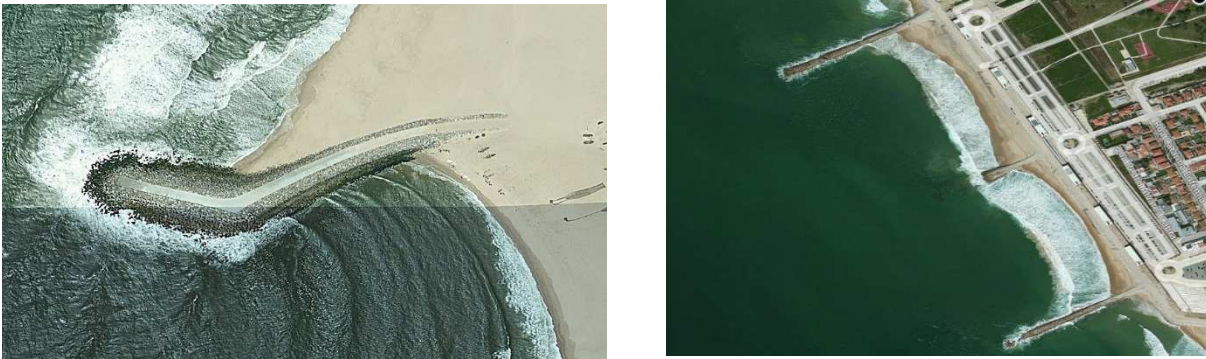


Figura 1 – Esporão com forma em planta do tipo S e agrupamento de esporões

Relativamente aos quebramares, estes são normalmente concebidos com o intuito de abrigar um porto da agitação marítima, melhorando as condições de acesso dos navios e a sua acostagem. São geralmente estruturas robustas, pois é frequente atingirem profundidades elevadas, estando assim sob ação de agitação marítima mais exigente, e com cotas de coroamento superiores à dos esporões evitando assim fenómenos de galgamento que provoquem agitação marítima na área protegida. É comum a largura do coroamento ser suficientemente larga por forma a permitir a passagem de equipamentos e veículos pesados permitindo realizar a construção da própria estrutura e operações de reparação e manutenção. Os quebramares destacados, Figura 2, são outro tipo de estrutura em taludes com uma função diferente dos quebramares aderentes.



Figura 2 – Quebramar destacado da barra do Douro

Este tipo de estrutura tem a função de proteger a linha da costa e por vezes favorecer a criação de praias através da criação de tómbolos. Os tómbolos estão associados ao fenómeno de difração que gera correntes das zonas mais agitadas para as zonas mais calmas. A criação desta corrente proporciona a acumulação de sedimentos mesmo que não exista transporte litoral (Veloso Gomes, 2013).

As estruturas longitudinais aderentes são implantadas paralelamente à linha de costa estando nela enraizada e a sua principal função é evitar a evolução do processo erosivo na linha de costa, sendo desta forma fixada a linha de costa. Este tipo de estruturas é frequentemente usado para proteger aglomerados populacionais junto à costa. Apesar da sua função ser semelhante à das dunas, o seu poder de dissipação de energia é menor, logo existirá um coeficiente de reflexão superior e conseqüentemente maiores erosões se verificam-se em frente à estrutura. Estas estruturas podem ter os taludes revestidos como os quebramares, ou seja, ser formada por duas ou três camadas de proteção ou então, podem ter taludes Rip-Rap. Rip-Rap é um método construtivo que consiste na proteção de taludes e dissipação de energia através de uma única camada relativamente fina de rochas e fragmentos de rochas. Este tipo de solução é comum em zonas marítimas onde a agitação é pouco energética. Na Figura 3 está representado um talude protegido por um sistema Rip-Rap.



Figura 3 – Exemplo da aplicação do sistema Rip-Rap

Quanto às risbermas, estas inserem-se nas estruturas anteriormente referidas representando um órgão de proteção conferindo estabilidade à estrutura, ou seja, com a agitação marítima verificam-se erosões localizadas junto a estas estruturas que, eventualmente, afetam a sua estabilidade podendo desencadear um processo de rutura. Com a implantação deste órgão de proteção a influência das erosões localizadas junto a estas estruturas são em parte anuladas. A frequente aplicação deste tipo de solução verifica-se há poucos anos pelo que não existe ainda um consenso comum sólido na comunidade da engenharia costeira acerca da sua implantação e dimensionamento. Alguns estudos foram realizados, no entanto, têm-se demonstrado insuficiente para a sua correta definição. Para além disso o seu comportamento difere de estrutura para estrutura, ou seja, a risberma não se comporta de forma igual num esporão, quebramar ou estrutura aderente, devido às características que lhes estão inerentes. Mesmo numa única estrutura é importante diferenciar a zona da cabeça da restante estrutura, pois as solicitações provocadas pela agitação marítima são mais exigentes nestas zonas.

1.3. OBJETIVO DA PESQUISA

Com o presente trabalho pretende-se recolher informação acerca dos estudos existentes que abordam a estabilidade de quebramares, nomeadamente, estudos que relacionam a estabilidade das estruturas marítimas com as risbermas, analisando as formulações existentes para a previsão da profundidade máxima de erosão junto a estruturas marítimas e do comportamento das estruturas a diferentes

risbermas. Com esta recolha de informação, os fenómenos hidrodinâmicos envolvidos na interação da estrutura marítima com a agitação marítima são mais facilmente compreendidos de forma a ser possível fazer uma análise crítica aos resultados obtidos em laboratório. Através desses resultados foi feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos e os resultados esperados teoricamente obtidos através da formulação aplicável ao modelo estudado.

1.4. PLANO DE PESQUISA E ESTRUTURA DO RELATÓRIO

De forma a alcançar os objetivos da pesquisa definiu-se uma estrutura sequencial desta dissertação.

No capítulo 2 é referenciada a pesquisa realizada sobre o presente tema, apresentando formulações e notas importantes acerca do processo erosivo dos fundos junto a estruturas marítimas de paredes verticais e em taludes e variáveis que condicionam estes mesmo processo. Para além disso apresentam-se soluções que previnem os problemas gerados por este mesmo processo.

No capítulo 3 é abordado o modelo testado em laboratório, fazendo referência a semelhanças de escalas, dimensionamento do modelo e descrição dos aparelhos de monitorização. Também é feita a descrição do programa de ensaio e os procedimentos pré-definidos a seguir durante os ensaios.

Relativamente ao capítulo 4 é feita uma descrição de cada ensaio, referindo problemas e notas retiradas durante a sua realização. São apresentados os resultados, sendo feita uma avaliação qualitativa e quantitativa e identificados os possíveis problemas que possam ter influenciado os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões acerca do comportamento da estrutura marítima estudada com diferentes risbermas de proteção do pé de talude sendo sugeridas recomendações e possíveis desenvolvimentos futuros.

Por forma a complementar esta dissertação, são adicionados sete anexos com informações relativas a valores da previsão da profundidade máxima de erosão, dimensionamento da estrutura marítima e modelo, soluções construtivas e resultados obtidos no trabalho laboratorial.

2 EROSÃO LOCALIZADA

Um ambiente marítimo é caracterizado pela conjugação de fenómenos como rebentação, empolamento, espraiamento, galgamentos, refração, refluxo, reflexão, etc. Devido a estes fenómenos e à agitação marítima, as estruturas construídas neste tipo de ambientes estão sujeitas a ações bastante exigentes e de difícil definição pelo facto de algum dos fenómenos supracitados serem ainda de difícil compreensão e existir uma interação entres fenómenos.

Uma das formas de rotura de uma estrutura marítima está associada à rotura da fundação que por sua vez pode desencadear uma rotura total ou parcial da estrutura. Geralmente, estas estruturas são implantadas em fundos móveis, pelo que a estrutura terá que ser dimensionada de forma a contornar os problemas de instabilidade dos fundos que possam ocorrer. Esta instabilidade decorre do facto dos fundos serem formados por sedimentos finos podendo ser transportados pelas correntes (caso de estruturas situadas em águas profundas) ou pela rebentação (caso de estruturas situadas em águas rasas). A interação da agitação marítima com os sedimentos é também ela bastante complexa onde o escoamento é tridimensional e, geralmente, turbulento. Assim, é perceptível a complexidade do estudo do fenómeno erosivo em meio marítimo. Os estudos realizados até hoje sobre este fenómeno são insuficientes e inconclusivos sendo que o seu tratamento pode contribuir com informação importante para a sua compreensão e definição.

Como já foi referido a erosão localizada representa uma das formas de rotura de uma estrutura e isto deve-se ao aparecimento de infraescavações que, no caso de estruturas de talude, provoca o deslizamento dos blocos do manto resistente e, conseqüentemente, a rotura parcial ou total da estrutura ou, no caso de estruturas verticais, diminui o fator de segurança ao derrube podendo conduzir à rotura da estrutura. A evolução da fossa de erosão pode ocorrer num curto intervalo de tempo, quando associada a uma agitação marítima mais exigente provocada por um temporal, ou então de uma forma mais prolongada associada a correntes marítimas. Esta último, geralmente está associada a profundidades de água elevada onde a ação das correntes é mais significativo.

As principais grandezas físicas que definem o processo erosivo localizado foram relatadas por Sumer e Fredsøe (2000) e são:

- Altura de onda incidente, H ;
- Período de onda, T ;
- Profundidade de água junto à estrutura, h ;
- Rugosidade do fundo, definida pela dimensão característica dos sedimentos, d ;
- A massa volúmica da água, ρ ;
- A viscosidade cinemática da água, ν .

Estas grandezas estão relacionadas com as características do fluido e da agitação marítima. No entanto, as características da estrutura marítima são também parâmetros importantes para o estudo deste fenómeno, podendo ser afetado pela:

- Inclinação dos taludes, α ;
- Porosidade;
- Permeabilidade;
- Rugosidade;
- Alinhamento em planta;
- Forma da cabeça da estrutura.

A definição teórica deste fenómeno é bastante complexa daí que a reprodução em modelo reduzido mostra-se indispensável para o seu estudo. Contudo, o modelo reduzido apresenta alguns problemas devido à difícil reprodução dos fenómenos associados à agitação marítima. Para além disso, os estudos realizados em modelo reduzido não reproduzem todos os fenómenos envolventes na agitação marítima e por vez aqueles que reproduz podem não estar a ser reproduzidos de uma forma realista, pelo que deve ser verificada a aplicabilidade da formulação que resulta de modelos reduzido. No entanto, é importante salientar que esta formulação representa uma ordem de grandeza e não um valor exato. Por vezes, para representar esta ordem de grandeza é aplicado um fator de incerteza.

As erosões localizadas são fenómenos que estão sempre associados a estruturas marítimas e verificam-se na presença de uma estrutura, daí que os estudos apresentado referem algumas soluções de forma a minorar a influência da fossa de erosão localizada na estabilidade da estrutura. Mesmo com a previsão das fossas de erosão e a aplicação de medidas preventivas é importante fazer uma boa monitorização e manutenção da estrutura, ou seja, tanto do órgão que resiste à ação direta das ondas como no órgão que combate a erosão localizada. A manutenção deste último órgão é geralmente ignorada pois os danos que lhe estão associados são menos perceptíveis, passando despercebidos os danos provocados pela agitação marítima.

A presença de uma estrutura num meio marítimo altera os mecanismos hidrodinâmicos naturais na sua proximidade. Sumer e Fredsøe, (2000), referiu algumas formas de alteração destes mecanismos entre elas:

- Contração do escoamento;
- Aparecimento de vórtices;
- Geração de turbulência;
- Reflexão;
- Difração;
- Rebentação;

Consequentemente, o transporte sólido também será condicionado por estas alterações, havendo zonas de erosões e deposições junto a estas estruturas, uma vez que as velocidades orbitais das partículas junto ao fundo aumentam. O transporte sólido pode ser feito no modo de arrastamento ou no modo suspenso. O transporte de sedimentos no modo suspenso está, geralmente, associado ao fenómeno de rebentação da onda que gera turbulência fazendo com que os sedimentos fiquem suspensos, facilitando assim o seu transporte.

O fenómeno de arrastamento dos sedimentos pode ser expresso pelo fator de ampliação da tensão de arrastamento, α , devido à presença da estrutura:

$$\alpha = \frac{\max(\tau_o)}{\tau} \quad (1)$$

Este fator relaciona a tensão máxima de arrastamento junto à estrutura, $\max(\tau_o)$, com a tensão de arrastamento natural, τ . O fator de ampliação da tensão de arrastamento pode ser afetado por um dos fenómenos acima referidos ou até mesmo pela conjugação desses fenómenos. A tensão máxima de arrastamento verifica-se próximo da estrutura, sendo que diminui em direção ao largo. O parâmetro mais comum para definir o início do movimento dos sedimentos é o parâmetro de Shields, θ_{cr} , que é definido por:

$$\theta_{cr} = \frac{U_{cr}^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (2)$$

em que $U_{cr}^* = \tau_{cr}/\rho$ representa a velocidade de atrito crítica, τ_{cr} é a tensão crítica de arrastamento, $s = \rho_s/\rho$, onde ρ_s é a massa volúmica dos sedimentos e ρ é a massa volúmica da água, d_{50} representa o diâmetro médio dos sedimentos e g a aceleração gravítica. O movimento dos sedimentos pode ser representado de duas formas: num movimento sedimentar global, $\tau_o > \tau_{cr}$, ou num movimento sedimentar local, $\tau_o > \tau_{cr}/\alpha$, (Fredsoe e Sumer, 1997).

O número de Reynolds, Re , é também um outro parâmetro que define o início do movimento das partículas e pode ser definido por:

$$Re = \frac{U_{cr}^* d_{50}}{\nu} \quad (3)$$

onde ν representa a viscosidade cinemática da água. Na Figura 4 está representada a curva de Shields, que relaciona o parâmetro de Shields com o número de Reynolds. Através destes dois parâmetros é definido o modo de transporte dos sedimentos.

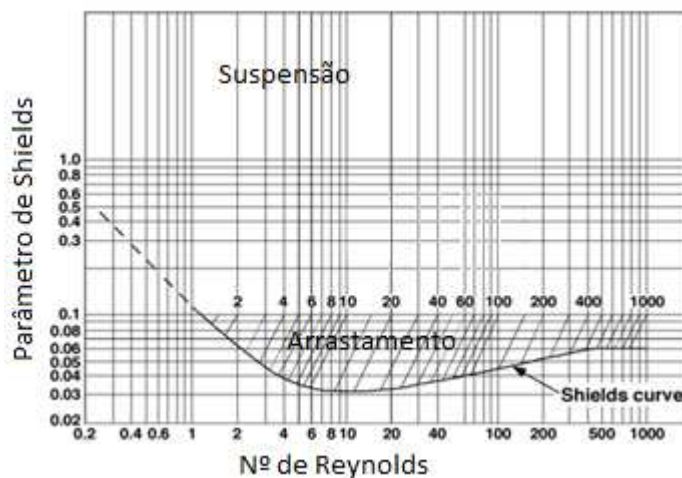


Figura 4 – Curva de Shields

A curva representa o limiar do início do movimento dos sedimentos, em que os pontos localizados acima da curva representam condições de escoamento em que ocorre movimento dos sedimentos no leito. O movimento de sedimentos pode ser feito de duas formas: modo suspenso ou no modo de não-suspenso, ou seja, na forma de arrastamento. O movimento no modo não-suspenso acontece quando a tensão verificada no fundo é superior à tensão crítica de arrastamento e os sedimentos começam a arrastarem-se ou a rolar. Ou seja, este movimento corresponde ao conjunto de pontos situados acima da curva de Shields próximos da zona a sombreado.

O conjunto de pontos acima da zona a sombreado, Figura 4, indicam que os sedimentos encontram-se em suspensão, ou seja, a sua movimentação é feita no modo suspenso. A tensão crítica de arrastamento está relacionada com a forma dos sedimentos. Quando a tensão de arrastamento é superior à tensão de arrastamento crítica dos sedimentos, a taxa de transporte aumenta devido à colisão entre os sedimentos. Este processo faz com que o transporte em modo suspenso seja atingido mais facilmente.

As erosões localizadas estão relacionadas com a forma como os sedimentos são movimentados. As erosões poderiam não ser um problema tanto para a estabilidade de estruturas como para a fixação da linha de costa se o processo erosivo e de deposição tivessem uma conjugação perfeita, ou seja, se a um processo erosivo estivesse sempre associado um processo de deposição em função do tempo e localização. Isto não se verifica junto a estruturas, em que a sua influência nos mecanismos hidrodinâmicos faz com que ocorra um perfil sequencial de erosões e deposições de sedimentos.

Devido a este tipo de problemas tornou-se necessário encontrar uma solução de forma a evitar que as fossas de erosão localizadas instabilizassem as estruturas marítima. No caso de estruturas em taludes as fossas de erosão localizada enfraquecem a fundação do manto resistente que conseqüentemente pode levar à rotura da estrutura.

No passado era comum o manto resistente ser suportado pelos fundos marítimos. Os fundos marítimos são geralmente formados por sedimentos de dimensões reduzidas devido a isso são suscetíveis a erosões e com isto não constitui um bom material de fundação para suportar a carga do manto resistente.

Hoje em dia já é hábito comum fundar o manto resistente em enrocamento. Esta fundação em enrocamento denomina-se risberma de proteção do pé de talude. Inicialmente, quando o conhecimento sobre as risbermas era ainda muito limitado, era considerado que, caso as características do enrocamento que constitui a risberma fossem as mesmas que o do manto resistente, a risberma encontrava-se estável. Esta era uma regra prática pouco fundamentada daí que diversos estudos têm sido desenvolvido por forma a haver um melhor e mais adequado dimensionamento da risberma. No entanto, ainda não existe nenhum consenso comum na comunidade da Engenharia marítima para a formulação deste tipo de elemento. Assim, ressalta a importância da realização de estudos acerca deste elemento para uma melhor compreensão acerca dos fenómenos que o condicionam e da sua eficácia.

Nos capítulos seguintes serão apresentadas algumas formulações propostas por diversos autores para a previsão da profundidade máxima de erosão junto à estrutura, tanto para quebra-mares de paredes verticais como para quebra-mares de taludes. É apresentada a formulação para estes dois tipos de estrutura uma vez que os fenómenos que lhe estão associados são semelhantes.

Para além do tipo de estrutura, a formulação diferenciar-se-á também pelo tipo de ondas incidentes, ou seja, ondas regulares ou irregulares com rebentação ou sem rebentação. Por vezes as características dos sedimentos são tidos em conta.

No presente estudo são apresentadas formulações de base teórica, probabilística e semi-empírica.

A erosão localizada é um dos modos de falha de uma estrutura marítima. Lillycrop e Hughes (1993) relataram, num relatório do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, falhas em quebra-mares devido

a erosões localizadas. Contudo, já desde muito cedo se estudava este fenómeno tanto em quebra-mares de taludes como em quebra-mares de paredes verticais.

De Best *et al.*, (1971), Xie (1981 e 1985), Irie e Nadaoka (1984), Hughes e Fowler (1991) e Oumeraci (1994), citados por Sumer e Fredsøe (2000), contribuíram com estudos importantes para a compreensão do processo de formação de erosões junto a quebra-mares de paredes verticais.

De particular interesse é o estudo realizado por Xie (1981) que estudou o processo erosivo em fundos móveis junto a quebra-mares de paredes verticais com e sem a presença da proteção do pé de talude, apresentando recomendações para a largura da risberma. É de salientar que este estudo foi realizado com a estrutura localizada numa zona sem rebentação.

Sawaragi (1966), Hales (1980), Eckert (1983) e Markle (1989), também citados no trabalho de Sumer e Fredsøe (2000), estudaram o processo erosivo 2D em frente a um quebramar de taludes. Fowler (1992) e Whitehouse (1998) realizaram estudos de forma a rever os estudos anteriores sobre o assunto. Da mesma forma que os quebra-mares de paredes verticais, o principal mecanismo de erosão localizada em quebra-mares de taludes é causado por ondas estacionárias em frente ao quebramar. A diferença do processo erosivo entre estes dois tipos de estruturas está associado com o coeficiente de reflexão, como demonstrado no trabalho de Sawaragi (1966). No trabalho de Arneborg *et al.* (1995) consideraram o coeficiente de reflexão como um parâmetro chave na simulação do modelo numérico do processo erosivo através da realização de testes, variando o coeficiente de reflexão em quebra-mares de paredes verticais e concluíram que as profundidades de erosão diminuem com a diminuição do coeficiente de reflexão. Todos os testes anteriormente referidos são referentes a estudos realizados a uma secção do tronco de um quebramar.

Sumer e Fredsøe (1997) e Fredsøe e Sumer (1997) investigaram o mecanismo de erosões localizadas junto à cabeça de um quebramar vertical e de taludes, respetivamente. Um processo tridimensional mais complexo diferente dos casos bidimensionais.

Sumer e Fredsøe (2000) realizaram um importante estudo onde investigaram o processo erosivo junto a um quebramar de taludes e a sua proteção de uma forma sistemática. Conclusões importantes foram retiradas deste estudo. Estas conclusões serão apresentadas mais à frente juntamente com a formulação apresentada pelo seu estudo.

2.1. QUEBRAMARES DE PAREDES VERTICAIS

Carter *et al.*, (1973), citado por Sumer e Fredsøe (2000) foram os primeiros a reconhecer mecanismo de formação de perfil erosões/deposições num campo de ondas estacionárias em conjunto com o desenvolvimento do perfil de erosão-deposição. Neste trabalho concluíram que o mecanismo chave é a ação das ondas estacionárias, levando à criação de um padrão de transmissão constante no plano vertical de um sistema de recirculação, Figura 5. Com a criação deste fenómeno há uma interação com os sedimentos, que consequentemente conduz a um reajustamento do perfil dos fundos. No caso de sedimentos finos, a interação das ondas poderá fazer com que estes sedimentos se movimentem sob a forma suspensa, elevando-os a altitudes mais elevadas. O mesmo não acontece com os sedimentos de maiores dimensões em que, numa situação onde a tensão seja suficientemente alta para possibilitar o seu movimento, estes serão movimentados na forma de arrastamento. Xie (1981) e Oumeraci (1994), citados por Sumer e Fredsøe (2000), descreveram no seu trabalho a influência das células de recirculação no fundo, definindo que as erosões se verificam na zona intermediária entre um nó e um anti-nó e as deposições na zona dos nós e anti-nós.

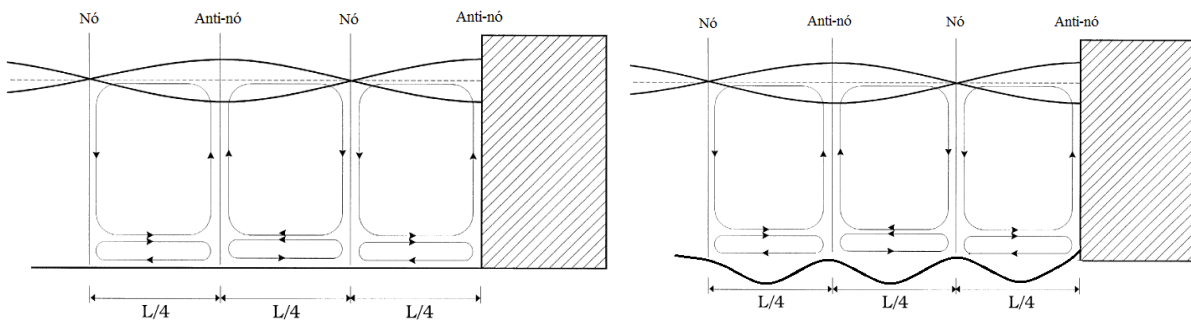


Figura 5 – Evolução dos fundos sujeitos à ação de ondas estacionárias. (Sumer e Fredsøe, 2000)

Assim, nos ensaios em laboratório é sugerido que os sedimentos se comportem como uma areia grossa, para que o transporte seja feito no modo não-suspensão. Portanto, a sua movimentação deve verificar-se nas células inferiores, levando a que as erosões aconteçam numa zona intermédia entre um nó e um anti-nó e as deposições se verifiquem nos nós, conforme referenciado por Xie (1981) e Oumeraci (1994b). A Figura 6 ilustra o perfil de equilíbrio erosões/deposições obtido num dos ensaios realizados por Sumer e Fredsøe, (2000) com ondas regulares a incidirem numa estrutura de paredes verticais. É possível verificar que as erosões se verificam a meia distância dos nós e anti-nós e as deposições ocorrem na zona dos nós e anti-nós. Isto confirma o relato feito por Xie (1981) e Oumeraci (1994b). Para além disso é possível observar que as deposições verificam-se mais ativas na zona dos nós.

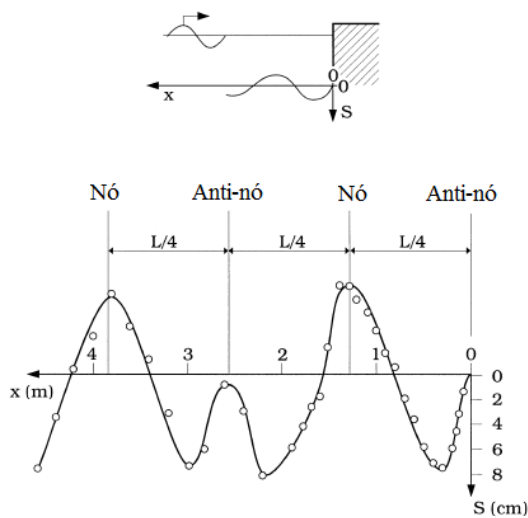


Figura 6 – Perfil de equilíbrio erosões/deposições – quebramar vertical (Sumer e Fredsøe, 2000)

2.2. QUEBRAMARES DE TALUDES EM ENROCAMENTO

Como já foi referido anteriormente, o processo erosivo junto a um quebramar de taludes é semelhante ao processo erosivo junto a um quebramar de paredes verticais, no entanto a principal diferença incide no coeficiente de reflexão, onde esse coeficiente é, geralmente, menor em estruturas com talude.

A configuração do perfil de equilíbrio erosões/deposições junto a estruturas em taludes é semelhante ao verificado em estruturas verticais. A diferença entre os perfis para as mesmas condições de onda reflete-se nas profundidades de erosão. Na Figura 7 está representado um perfil em equilíbrio de erosões-deposições resultante de um dos realizados por Sumer e Fredsøe, (2000) para o caso de um quebramar de taludes em enrocamento exatamente sob as mesmas condições de onda incidente como no caso do quebramar de parede vertical apresentado na Figura 6. É possível verificar que o mecanismo de erosão ocorre essencialmente da mesma forma em ambos os casos. No entanto, é importante salientar algumas anotações:

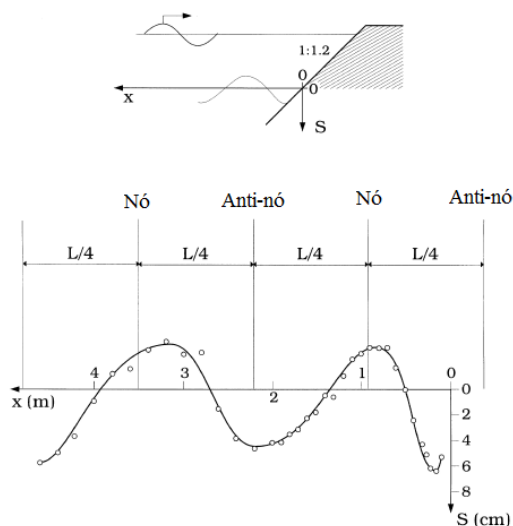


Figura 7 – Perfil de equilíbrio erosão/deposição – quebramar em taludes (Sumer e Fredsøe, 2000)

Em primeiro lugar, junto dos quebramares de parede vertical os valores da profundidade de erosão são nulos enquanto que no caso de um quebramar de taludes esse valor difere de zero. O facto de haver uma quantidade substancial de erosão junto ao quebramar de taludes sugere que o fluxo nesse local possa ser significativo. Isto está, evidentemente, relacionado com a superfície inclinada do quebramar e, conseqüentemente, com o efeito do refluxo da onda. Além disso, deve-se referir que pode haver um fluxo no interior do quebramar em direção à camada de areia, e isto pode contribuir para o fenómeno de erosões na fronteira quebramar/fundo.

Em segundo lugar, segundo Xie (1981), embora não ocorram erosões significativas na zona dos anti-nós para o caso de quebramares de parede vertical, o mesmo não ocorre nos quebramares de talude, em onde se verificaram fenómenos erosivos significativos nesses mesmos locais sem que existisse alguma explicação clara para tal ocorrer.

É também de referir, que a profundidade máxima de erosão, no caso de quebramares de taludes é cerca de 25% menor do que no caso de quebramares de paredes verticais. Isto é espectável pois o coeficiente de reflexão é menor no quebramar de taludes e conseqüentemente a profundidade de erosão será menor.

Por fim, é interessante referir que em ambos os casos a deposição ocorre nos nós. No entanto, no caso dos quebramares de taludes existe um pequeno desvio nas zonas de deposição máxima em direção à costa. Segundo Hughes e Fowler (1995), citado por Fredsøe e Sumer (1997), esta mudança pode ocorrer devido à mudança de fase da onda refletida. Este efeito leva à alteração da posição dos nós e anti-nós. No caso de quebramares de parede vertical esta mudança de fase é próxima de zero, logo os locais de deposição máxima são coincidentes com os pontos nodais, $L/4$.

2.3. PREVISÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROSÃO – MÉTODOS TEÓRICOS E SEMI-EMPÍRICOS

Existem muitas formulações laboratoriais e teóricas que conduzem a análises dos processos de erosão localizada. Alguns estudos focam-se na exploração dos mecanismos físicos responsáveis por este processo, enquanto que outros estudos concentram-se no desenvolvimento de métodos para prever a localização e profundidade máxima de erosão localizada. Serão apresentados alguns métodos desenvolvidos para prever erosões localizadas tanto em quebra-mares de paredes verticais como em quebra-mares de taludes. Os métodos semi-empíricos apresentados neste capítulo têm como base ensaios realizados em laboratório em modelos reduzidos.

2.3.1. QUEBRAMARES DE PAREDES VERTICAIS

A ocorrência de erosão localizada em quebra-mares de paredes verticais está diretamente relacionada com a localização da estrutura, ou seja, se a estrutura se encontra dentro ou fora da zona de rebentação. A não rebentação da onda está geralmente associada a estruturas que se encontram localizadas em profundidades de água elevadas. Neste tipo de estruturas o coeficiente de reflexão é elevado (a não ser que a estrutura esteja dotada com dispositivos de dissipação de energia) havendo assim uma conjugação entre a onda incidente e a onda refletida criando um fluxo horizontal próximo da estrutura.

Herbich e Ko (1968), Xie (1981 e 1985), Hughes e Fowler (1991) e Sumer e Fredsøe (1997), citados por Sutherland *et. al.*, (2003), desenvolveram estudos para prever a profundidade máxima de erosão junto a quebra-mares verticais fora da zona de rebentação.

A erosão localizada é causada pelo fluxo induzido pelas ondas estacionárias. Este fluxo está condicionado pela altura de onda incidente, H , o período da onda incidente, T , a profundidade de água, h , a rugosidade do fundo caracterizado pela dimensão dos sedimentos, d , a densidade da água, ρ , e a viscosidade da água, ν .

A partir da análise dimensional, podem ser encontradas as características da erosão localizadas para o caso do transporte em modo não-suspensão em função dos seguintes parâmetros:

$$\frac{S}{H} = f\left(\frac{h}{L}; \alpha; \theta; \frac{L}{d_{50}}; Re\right) \quad (4)$$

onde α representa o ângulo de inclinação do talude do quebramar, θ o parâmetro de Shields e Re o número de Reynolds definido por:

$$Re = \frac{aU_m}{\nu} \quad (5)$$

onde a representa a amplitude do movimento orbital das partículas de água, U_m o valor máximo da velocidade orbital no fundo e ν a viscosidade dinâmica da água.

No caso de uma situação de tempestade, o fundo atua como uma parede áspera, portanto o número de Reynolds, Re , diminui. Além disso, quando é considerada a erosão num fundo vivo, isto é, $\theta > \theta_{cr}$, a influência do parâmetro de Shields, θ , não é muito importante. Assim, estes dois parâmetros podem ser ignorados numa primeira aproximação. Consequentemente, as características de erosão variam apenas com h/L , α e L/d_{50} . Segundo os dados de Xie (1981), Sumer e Fredsøe (2000) concluíram que o parâmetro L/d_{50} afeta de uma forma pouco significativa os resultados finais assumindo assim que este

parâmetro pode ser também ignorado restando apenas os parâmetros h/L e α . Também é importante ter em atenção a influência do período sob a forma do número de Keulegan-Carpenter, KC , como um outro parâmetro responsável pelo processo do fluxo. O número de Keulegan-Carpenter, por vezes denominado número de período, é um valor adimensional que descreve a importância relativa das forças de arrastamento com as forças de inércia para objetos num fluxo de fluido oscilatório. Este valor adimensional é definido por:

$$KC = \left(\frac{U_m T}{B} \right) \quad (6)$$

onde U_m representa a velocidade orbital máxima no fundo, T o período de onda regular e B o diâmetro da cabeça do quebramar.

Sumer e Fredsøe (1997) realizaram uma série de testes para três intervalos de KC . Com isto distinguiram três tipos de escoamento distinto na proximidade da estrutura, Figura 8:

- $KC < 1$ – Escoamento inalterado
- $1 < KC < 12$ – Separação do escoamento, com formação de vórtices na zona abrigada pela estrutura. A forma como o vórtice se desenvolve não depende do valor de KC .
- $KC > 12$ – Separação do escoamento com formação de vórtice na zona abrigada e aparecimento de vórtice tipo ferradura.

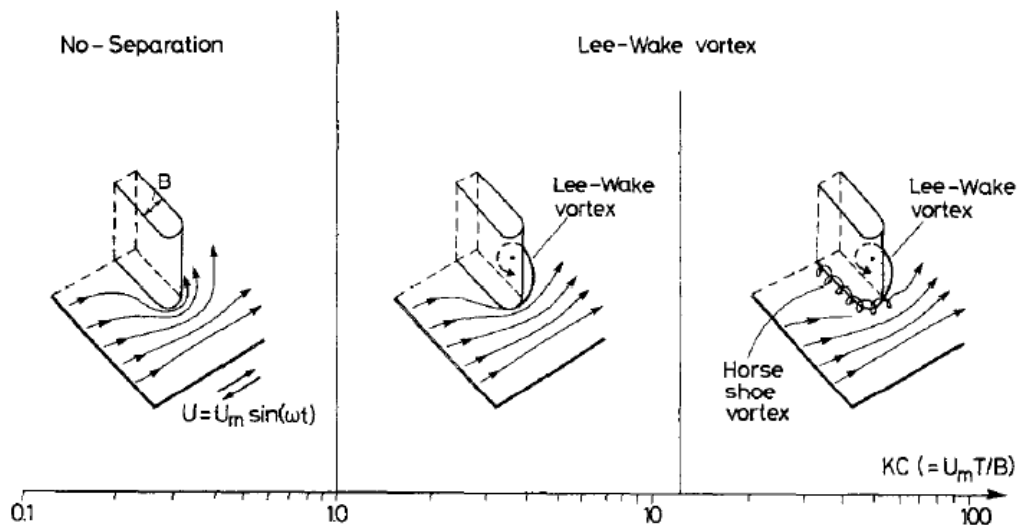


Figura 8 – Escoamento junto à cabeça de uma quebramar vertical (Sumer e Fredsøe, 1997)

Herbich e Ko (1968) desenvolveram uma formulação teórica através de equações de fluxos de água e fronteiras para a definição da profundidade máxima de erosão. Esta formulação é aplicável tanto em estruturas verticais como em estruturas em taludes sob condições de onda sem rebentação.

$$S_{Max} = \left(h - \frac{A}{2} \right) (1 - K_r) u_* 0,75 C_D \rho \left(\frac{\cot(\theta)}{d_{50}(\gamma_s - \gamma)} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (7)$$

onde:

K_r : coeficiente de reflexão (H_r/H_i);

A : altura de onda junto à estrutura ($A=H_i+H_r$);

S_{Max} : profundidade média máxima de erosão;

h : profundidade de água junto à estrutura;

u_* : velocidade horizontal no fundo;

C_D : coeficiente de dragagem dos sedimentos;

ρ : densidade do fluido;

θ : ângulo de repouso dos sedimentos;

d_{50} : diâmetro efetivo médio dos sedimentos;

γ : peso volúmico do fluido;

γ_s : peso específico dos sedimentos.

Esta relação prevê a profundidade de erosão num fundo sem qualquer tipo de proteção, ou seja, sem risberma de proteção do pé de talude.

Esta formulação teórica foi comparada com os resultados de um ensaio laboratorial realizado num canal. Com este ensaio verificou-se que os limites de profundidade de erosão localizada se aproximam da formulação teórica, sendo que a erosão é bastante ativa durante as primeiras horas e o perfil erosões-deposições tende a estabilizar ao longo do tempo.

Mais tarde, Xie (1981) realizou ensaios laboratoriais para estudar o fenómeno erosivo e estabelecer uma formulação empírica para a definição da profundidade máxima de erosão junto a um quebramar vertical.

A Figura 9 exibe os dados retirados dos ensaios laboratoriais realizados por Xie (1981) e por Sumer e Fredsøe (2000) em que na figura da esquerda estão representados os dados relativos a quebramar de paredes verticais com fundos móveis em areia fina ("Fine sand") e areia grossa ("Coarse sand") e na figura da direita apresentam-se os dados relativos a uma quebramar de taludes para diferentes inclinações.

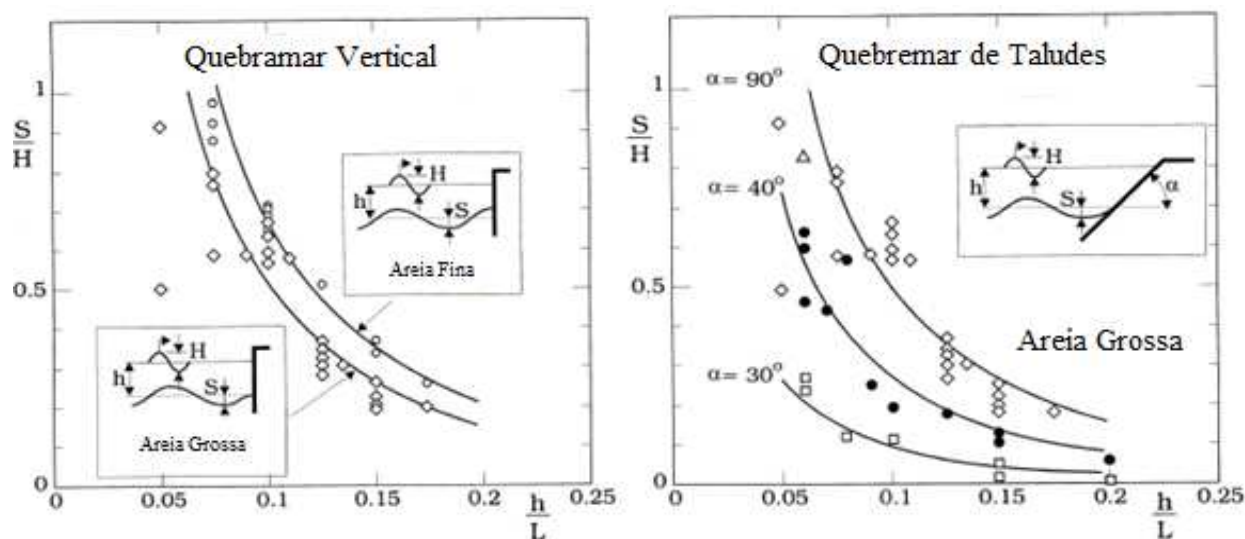


Figura 9 – Profundidade máxima de erosão junto a uma quebramar (Sumer e Fredsøe, 2000)

Tabela 1 – Legenda da Figura 9 com descrição das características dos ensaios correspondentes

Simbolo	Autor	Quebramar	Modo de Transporte	Ângulo do Talude	h (cm)	H (cm)	T (s)	d ₅₀ (mm)
○	Xie (1981)	Vertical	Suspensão (Areia Fina)	90	30 - 50	5 - 10	1,17 - 3,12	0,1 - 0,2
◇	Xie (1981)	Vertical	Arrastamento (Areia Grossa)	90	30 - 50	4,5 - 11	1,17 - 3,56	0,1 - 0,78
△	Sumer e Fredsøe (2000)	Vertical	Arrastamento (Areia Grossa)	90	31	9,7	3	0,2
●	Sumer e Fredsøe (2000)	Taludes	Arrastamento (Areia Grossa)	40	31	6,3 - 12,7	1,08 - 3	0,2
□	Sumer e Fredsøe (2000)	Taludes	Arrastamento (Areia Grossa)	30	31	6,3 - 12,7	1,08 - 3	0,2

Pela análise dos resultados apresentados é possível observar que o diâmetro dos sedimentos que constituem os fundos influencia a profundidade máxima de erosão, sendo que esta será maior quanto menor for a dimensão dos sedimentos que constituem os fundos. Isto está em parte relacionado com o modo de transporte dos sedimentos em que em situações de areia fina o transporte é realizado no modo suspenso. Relativamente aos quebramares de taludes, a sua inclinação interfere no perfil dos fundos sendo que uma inclinação menor implica profundidades de erosão menores. Isto está associado com o coeficiente de reflexão da estrutura.

Através dos resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais representados na Figura 9 à esquerda, Xie (1981) definiu a seguinte expressão empírica para a profundidade máxima de erosão no caso de fundos em areia fina sob condições de ondas sem rebentação:

$$\frac{S}{H} = \frac{0,4}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}} \quad (8)$$

Para a profundidade máxima de erosão no caso de um fundo em areia grossa e condições de onda sem rebentação a expressão assemelha-se à anterior:

$$\frac{S}{H} = \frac{0,3}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}} \quad (9)$$

A formulação estabelecida por Xie (1981) é válida para quebramares verticais sujeito a ondas regulares incidentes normalmente à estrutura fora da zona de rebentação.

Estes resultados mostraram-se coerentes com o trabalho de Hughes e Fowler (1991), citado pelo CEM. Eles propuseram a seguinte expressão empírica para previsão da profundidade máxima de erosão a barlar de quebramares de parede vertical:

$$\frac{S_m}{(u_{rms})_m T_p} = \frac{0,05}{[\sinh(k_p h)]^{0,35}} \quad (10)$$

onde T_p representa o período de onda de pico, k_p é o número de onda associado a um pico espectral definido por $k_p = \frac{2\pi}{L}$ e $(u_{rms})_m$ é a raiz quadrática média da velocidade no fundo e é definida por Hughes (1992):

$$\frac{(u_{rms})_m}{g k_p T_p H_{m0}} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi \cosh(k_p h)} \left[0,54 \cosh\left(\frac{1,5 - k_p h}{2,8}\right) \right] \quad (11)$$

$$0,05 < k_p h < 3,0$$

onde H_{m0} é a altura de onda do momento espectral de ordem zero e g a aceleração da gravidade.

Na Figura 10 estão representadas as relações feitas por Xie (1981) e por Hughes e Fowler (1991), apresentado no CEM para ondas regulares e irregulares, respectivamente, para o caso de quebramares de paredes verticais.

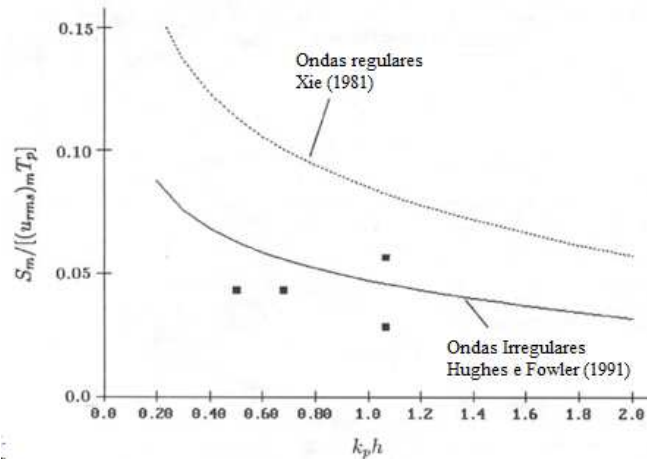


Figura 10 – Previsão da profundidade máxima de erosão junto a um quebramar vertical (CEM)

Sumer e Fredsøe (1997) realizaram um estudo com o objetivo de prever a profundidade de erosão máxima junto à cabeça de um quebramar vertical. Neste estudo foram realizados ensaios com ondas regulares onde o principal parâmetro usado na definição do fluxo e da estabilidade do perfil erosão-deposição foi o número de Keulegan-Carpenter (KC).

Sugeriram que U_m pode ser calculado através da teoria linear de onda para definir a velocidade no fundo usando uma altura de onda de:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} H_s \quad (12)$$

A profundidade de erosão localizada aumenta com o aumento do número de Keulegan-Carpenter. Através deste estudo definiram uma nova formulação para a definição da profundidade máxima de erosão junto à cabeça de quebramares de paredes verticais, em função de KC e do diâmetro do quebramar

$$\frac{S_m}{B} = 0,5 C_u [1 - e^{-0,175 (KC-1)}] \quad (13)$$

onde C_u representa um coeficiente de incerteza com valor da unidade e uma variação de $\sigma=0,6$. Esta expressão é válida no intervalo $0 < KC < 10$ e para condições de onda sem rebentação.

Todas as formulações anteriormente referidas aplicáveis a quebramares verticais enquadram-se apenas em situações em que não é considerada a rebentação. O fenómeno de rebentação influencia diretamente o processo erosivo, agravando-o. Daí a importância do estudo da erosão localizada com ondas com rebentação, contudo o conhecimento da influência da rebentação no processo erosivo é ainda muito

limitado. Para além disso, os estudos que relacionam o processo erosivo com a rebentação são aplicados na sua maioria a quebramares de paredes verticais.

A erosão causada pela rebentação é geralmente maior do que nos casos em que a rebentação não está presente havendo maior probabilidade do processo erosivo dos fundos junto à estrutura conduzir a uma rotura da estrutura. Por exemplo, a rebentação da onda imediatamente antes do encontro com a estrutura mobiliza sedimentos da risberma devido à inevitável presença de turbulência e vórtices. No caso da rebentação se verificar diretamente sobre a estrutura a mobilização de sedimentos está relacionada com os fenómenos de espraio e refluxo.

Song e Schiller (1973) e Fowler (1992), citados por Sutherland *et. al.*, (2003) estudaram o processo erosivo em quebramares verticais sujeitos à rebentação das ondas.

Song e Schiller (1973) definiram a seguinte fórmula para previsão da profundidade de erosão em quebramares verticais com ondas a incidirem normalmente à estrutura.

$$\frac{S}{H_0} = 1,94 + 0,57 \ln\left(\frac{X}{X_b}\right) + 0,72 \ln\left(\frac{h}{L}\right) \quad (14)$$

Onde:

L: comprimento de onda;

H₀: altura de onda ao largo;

h: profundidade de água;

X: distância horizontal da linha de costa;

X_b: distância horizontal da linha de costa à zona de rebentação.

No entanto, Powell (1987) e Fowler (1996) verificaram que a aplicabilidade desta formulação apenas se verifica nos seguintes intervalos:

$$0,5 < \frac{X}{X_b} < 1,0 \text{ (Powell, 1987)}$$

$$0,67 < \frac{X}{X_b} < 1,38 \text{ (Fowler, 1996)}$$

Na Figura 11 está representada a variação da distância relativa (X/X_b) em função da declividade de onda (H_s/L_s) e da profundidade de erosão relativa.

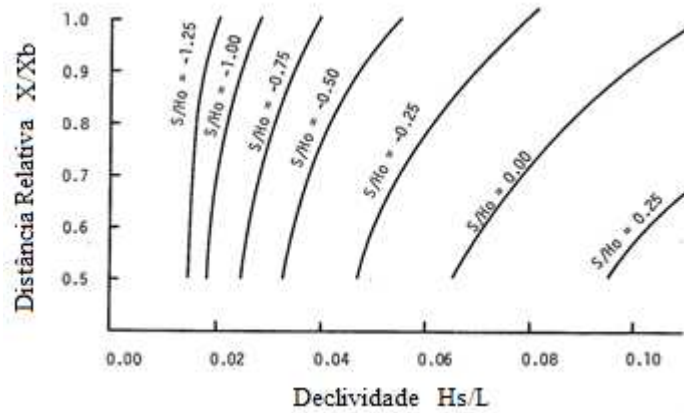


Figura 11 – Variação de X/X_b com H_s/L e S/H_0 (Sutherland *et. al.*, 2003)

Fowler (1992) apresenta uma formulação da previsão da profundidade máxima de erosão onde considera a rebentação das ondas, estudando a sua influência no processo erosivo em quebra-mares de parede vertical através da análise de 22 testes (18 testes com ondas irregulares e 4 testes com ondas regulares). Na Figura 12 estão representados os resultados obtidos no trabalho de Fowler (1992) referenciado pelo CEM que conduziu à seguinte fórmula:

$$\frac{S_{Max}}{H_{m0}} = \left(22,72 \frac{h}{L_0} + 0,25 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

A fórmula 15 é válida nos seguintes intervalos:

$$0,011 \leq \frac{h}{L_0} \leq 0,025$$

$$0,015 \leq \frac{H_{m0}}{L_0} \leq 0,040$$

onde H_{m0} representa a altura de onda de momento espectral de ordem zero e L_0 o comprimento de onda associado a um período de onda espectral, $L_0 = \left(\frac{g}{2\pi} \right) T_p^2$.

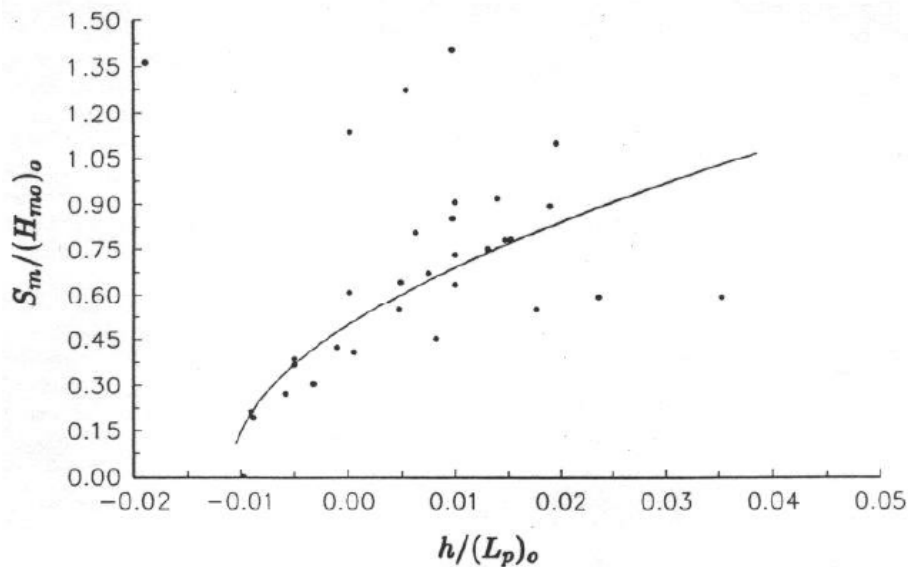


Figura 12 – Profundidade relativa de erosão $S_m/(H_{mo})_o$ em função de $h/(L_p)_o$ (CEM)

Fowler (1992) não considerou parâmetros relativos às características dos sedimentos, sendo assim esperado que possa ter alguma influência no processo erosivo. Contudo, o transporte de sedimentos devido à rebentação não tem grande dependência do parâmetro de Shields devido à natureza da turbulência, diminuindo a influência do diâmetro dos sedimentos na previsão da profundidade máxima de erosão.

Com este trabalho concluiu que a profundidade máxima com ondas regulares é cerca de 15% maior que a profundidade máxima provocada por ondas irregulares. Referiu ainda como regra a seguir assumir que a profundidade de erosão com ondas sem rebentação é igual ou menor que no caso de ondas com rebentação.

O *Coastal Engineering Manual* define algumas regras práticas a seguir no caso de quebramares verticais sob condições de onda com rebentação:

- A profundidade máxima de erosão (S_m) é aproximadamente igual à altura de onda máxima (H_{max}) possível naquela profundidade, h .
- A profundidade máxima ocorre quando a estrutura está localizada numa zona onde a rebentação é feita na forma mergulhante.

2.3.2. QUEBRAMARES DE TALUDES

A previsão da profundidade de erosão localizada junto a quebramares de taludes é ainda um assunto pouco aprofundado na engenharia costeira. Apesar do processo erosivo ser semelhante ao verificado em quebramares verticais, o seu tratamento neste tipo de estruturas é ainda muito limitado não existindo um consenso comum na comunidade da engenharia costeira que defina de forma clara e precisa a previsão de erosão junto a quebramares de taludes.

Herbich e Ko (1968), Fredsøe e Sumer (1997) e Sumer e Fredsøe (2000), citados por Sutherland *et. al.*, (2003) definiram formulações de previsão da profundidade de erosão. A formulação definida pelos primeiros autores foi referida anteriormente uma vez que a sua formulação se aplica tanto a quebramares verticais como de taludes.

Fredsøe e Sumer (1997) realizaram ensaios em modelo reduzido sob um fundo móvel de forma a investigar os mecanismos de formação de erosões junto a cabeças de quebramares de taludes. Este trabalho assemelha-se ao seu trabalho realizado em quebramares verticais. A estrutura era constituída por taludes com uma superfície em aço e com uma inclinação de 1:1,5, comportando-se assim como uma superfície impermeável e lisa. Os testes realizaram-se com ondas irregulares a incidirem normais à estrutura. Foram consideradas duas condições de onda: ondas sem rebentação e ondas com rebentação. No caso de erosões na cabeça de quebramares de taludes sujeito a ondas sem rebentação o principal parâmetro que lhe está associado é o número de Keulegan-Carpenter, enquanto que o parâmetro $\frac{T_p \sqrt{gH_s}}{h}$ caracteriza o processo erosivo sujeito à rebentação de ondas. A profundidade de erosão diminui com a diminuição destas dois parâmetros.

ONDAS SEM REBENTAÇÃO

A erosão provocada por ondas sem rebentação na cabeça de uma quebramar de taludes depende da velocidade máxima orbital no fundo, U_m , o período de onda, T_p , o diâmetro da cabeça da cabeça, B , a rugosidade do fundo que é caracterizado pelo diâmetro dos sedimentos, d , da viscosidade cinemática do fluído, ν , e da inclinação do quebramar, m . Assim, é possível definir a análise dimensional do processo erosivo e de deposição:

$$\frac{S}{B} = f\left(KC, \theta, m, \frac{a}{d}, Re\right) \quad (16)$$

$$\frac{D}{B} = g\left(KC, \theta, m, \frac{a}{d}, Re\right) \quad (17)$$

em que a representa a amplitude do movimento orbital dos fundos. A erosão e deposição apenas variam com o número de Keulegan-Carpenter, KC e o parâmetro de Shields, θ . Como acontece no caso de quebramares verticais, também neste caso a influência do parâmetro de Shields não é muito importante e pode ser ignorado pelas mesmas razões. Assim, o processo erosivo apenas dependerá do número de Keulegan-Carpenter, KC .

Na Figura 13 é possível analisar a influência do KC no processo erosivo e no processo de deposição junto à cabeça de um quebramar.

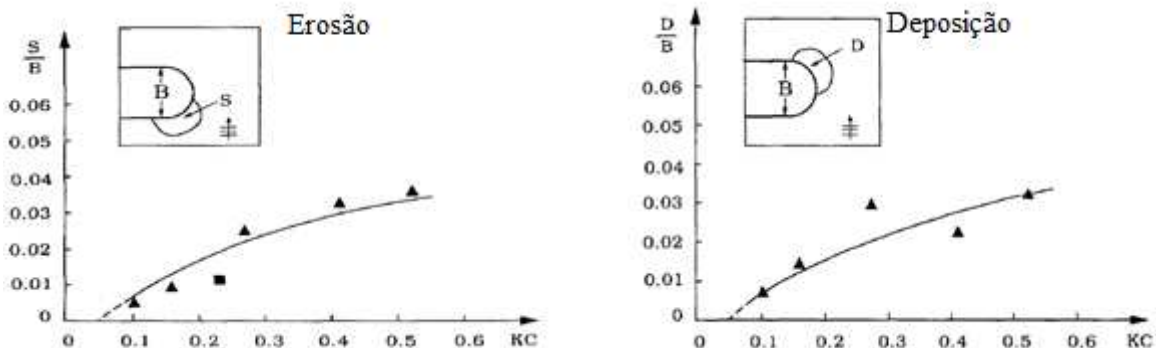


Figura 13 – Profundidade máxima de erosão e deposição (Fredsoe e Sumer, 1997)

Como é possível analisar pela Figura 13 o aumento do número de Keulegan-Carpenter provoca um aumento das profundidades de erosões e deposições. Os resultados mostram-se coerentes com o trabalho de campo realizado por Lillycrop e Hughes (1993) acerca de problemas em estruturas marítimas nos EUA.

Através deste estudo, Fredsøe e Sumer (1997) chegaram à seguinte expressão para previsão da profundidade máxima de erosão junto à cabeça de um quebramar de taludes em função de KC apresentada pelo CEM:

$$\frac{S}{B} = 0,04 C_u [1 - e^{-4,0(KC-0,05)}] \quad (18)$$

onde C_u representa uma fator de incerteza com valor médio da unidade e uma variação de $\sigma=0,2$.

ONDAS COM REBENTAÇÃO

A erosão provocada pela rebentação das ondas depende da velocidade de rebentação (no ponto onde a onda mergulha) e da dimensão de onda. A velocidade de rebentação e a dimensão da onda depende da altura de onda, H , do período de onda, T , da profundidade de água, h , da inclinação do talude, α , e da aceleração da gravidade, g . Assim define-se a análise dimensional do processo erosivo em função dos seguintes parâmetros:

$$\frac{S}{H_s} = f\left(\frac{T_p \sqrt{gH_s}}{h}; \theta; \alpha\right) \quad (19)$$

O parâmetro de Shields, θ , pode ser desprezado pela razões já referidas e, desta forma, o processo erosivo fica a depender apenas do parâmetro adimensional $\frac{T_p \sqrt{gH_s}}{h}$.

Na Figura 14 estão representados os resultados dos ensaios realizados por Fredsøe e Sumer (1997) e Lillycrop e Hughes (1993).

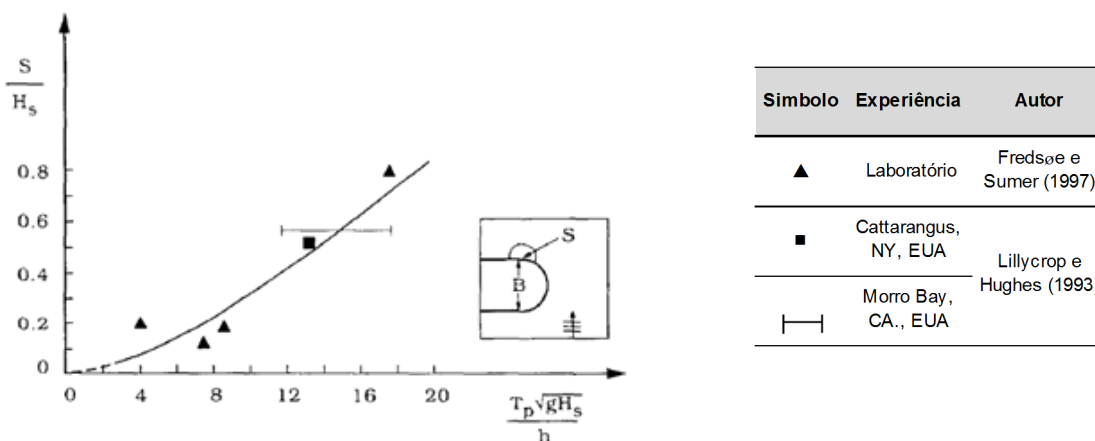


Figura 14 – Profundidade máxima de erosão a barlar (Fredsøe e Sumer, 1997)

Através destes resultados, Fredsøe e Sumer (1997) chegaram à seguinte formulação para previsão da profundidade máxima de erosão:

$$\frac{S}{H_s} = 0,01 C_u \left(\frac{T_p \sqrt{g H_s}}{h} \right)^{1,5} \quad (20)$$

onde C_u representa um fator de incerteza com valor médio de valor da unidade e uma variação de $\sigma=0,34$.

Sumer e Fredsøe (2000) realizaram ensaios num modelo da cabeça de um quebramar de taludes com ondas regulares e ondas irregulares, chegando à conclusão que os perfis obtidos diferem de uma forma significativa. Na Figura 15 é possível observar três perfis no caso de ondas irregulares para três valores diferentes do parâmetro h/L_0 , em que L_0 é o comprimento de onda associado a um período de pico.

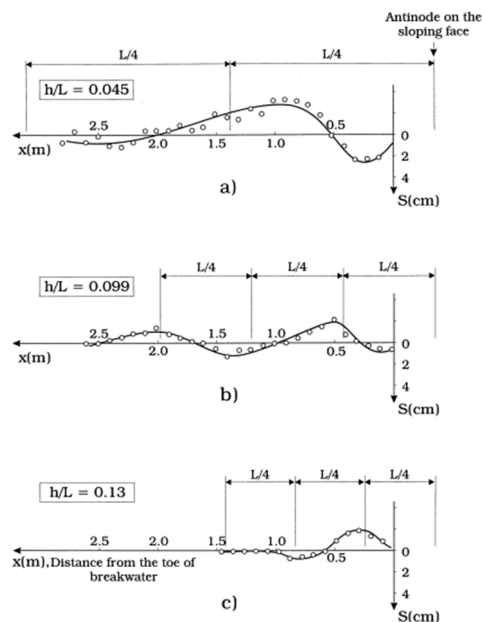


Figura 15 – Perfis tipos dos fundos para diferentes valores de h/L (Fredsøe e Sumer, 1997)

Na Tabela 2 estão representadas as profundidades máximas de erosão pela aplicação da fórmula 20 para diferentes alturas de onda de dimensionamento e períodos no caso de um fator de incerteza $C_u=1,00$.

Tabela 2 – Previsão da profundidade máxima de erosão através da fórmula 20

PM – 4m				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs (m)	H _{max} =0.78h (m)	H _d (m)	Profundidade Máxima de Erosão, S _m (considerada rebentação) (m)							
1	3	2,34	2,34	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	
0	4	3,12	3,12	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,1	
-1	5	3,9	3,9	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	
-2	6	4,68	4,68	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	
-3	7	5,46	5,46	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	
-4	8	6,24	6,24	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	
-5	9	7,02	7,02	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	

É importante salientar que estas expressões foram desenvolvidas para cabeças de quebramares impermeáveis e com uma superfície lisa. Assim, os resultados foram sobrevalorizados estando do lado da segurança, uma vez que com a permeabilidade e rugosidade característica de um quebramar de taludes em enrocamento são esperadas profundidades máximas de erosão inferiores à estimada pela fórmula anteriormente referida.

As conclusões retiradas do trabalho de Sumer e Fredsøe (2000) foram as seguintes:

- (1) verifica-se que, ao contrário dos perfis finais sob ação de ondas regulares, não existe uma sequência erosão-deposição constante, ou seja, a partir de certo ponto não se verificam qualquer tipo de erosão. Isto verifica-se uma vez que, no caso de ondas irregulares, a altura de onda apenas surge como uma onda estacionária próximo da estrutura, enquanto que no caso de ondas regulares existe um padrão e a altura de onda estende-se ao longo de toda a área enfrente à estrutura.
- (2) o local onde a deposição é máxima não ocorre sempre junto ao quebramar.
- (3) a profundidade máxima de erosão no caso de ondas irregulares é geralmente menor do que no caso de ondas regulares. É possível observar na Figura 16 a profundidade de erosão para os dois casos, onde H é tomado como o valor da raiz quadrática média da altura de onda, H_{rms}, no caso de ondas irregulares, isto porque no caso de ondas irregulares a altura de onda registada é menor que a altura de onda convencional registada no caso de ondas regulares.

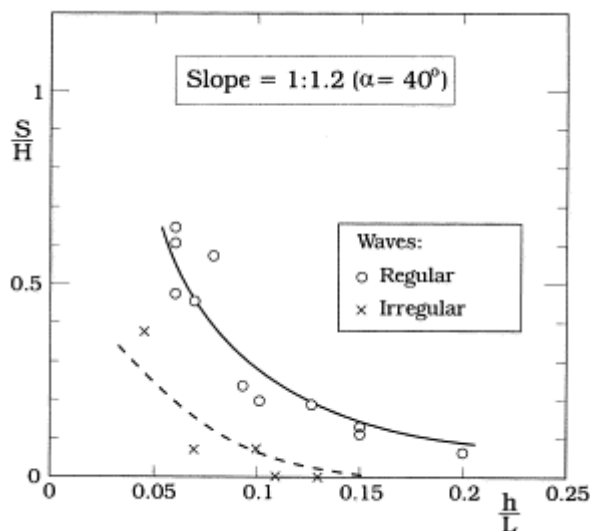


Figura 16 – Profundidade máxima de erosão (Sumer e Fredsøe, 2000)

Com este trabalho, Sumer e Fredsøe (2000) reformularam as fórmulas 8 e 9 definidas por Xie (1981) para quebra-mares verticais sob ação de ondas regulares em função do ângulo do talude.

$$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}} \quad (21)$$

em que $f(\alpha)$ é função do ângulo do talude α . $f(\alpha)$ é definido por:

$$f(\alpha) = 0,3 - 1,77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right), \alpha \in [30^\circ; 90^\circ] \quad (22)$$

Através da análise da Figura 9 é possível concluir que a profundidade de erosão diminui com a diminuição do ângulo do talude, ou seja, quanto menor o ângulo do talude menor serão as profundidades máximas de erosão. Isto deve-se ao facto do coeficiente de reflexão diminuir com a inclinação.

Pela análise da Figura 16 é possível observar que a profundidade de erosão é cerca de duas vezes menor no caso de ondas irregulares.

Na Tabela 3 é possível analisar as profundidades máximas esperadas pela aplicação das fórmulas 21 e 22 para as mesmas condições de onda e período da Tabela 2.

Tabela 3 – Previsão da profundidade máxima de erosão através das fórmulas 21 e 22

PM – 4m

Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78h	T (s)= H _d	6	7	8	9	10	11	12
				Profundidade Máxima de Erosão, S _m (considerada rebentação) (m)						
1	3	2,34	2,34	0,6	1,0	1,4	2,0	2,6	3,4	4,3
0	4	3,12	3,12	0,5	0,9	1,3	1,8	2,4	3,1	3,9
-1	5	3,9	3,9	0,5	0,8	1,2	1,6	2,2	2,8	3,6
-2	6	4,68	4,68	0,4	0,7	1,1	1,5	2,0	2,6	3,4
-3	7	5,46	5,46	0,4	0,6	1,0	1,4	1,9	2,5	3,2
-4	8	6,24	6,24	0,3	0,6	0,9	1,3	1,8	2,4	3,0
-5	9	7,02	7,02	0,3	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	2,9

É possível verificar diferenças significativas entre os resultados da Tabela 2 e Tabela 3. Na primeira, a profundidade de erosão aumenta com o período mas diminui com a profundidade de água. Na segunda, da mesma forma que no caso anterior, a profundidade de erosão, aumenta com o período, no entanto verifica-se que também aumenta com a profundidade de onda. Estas diferenças podem estar relacionadas com o modo de concepção do quebramar, ou seja, enquanto que os resultados da Tabela 3 baseados na fórmula 21 e 22 foram obtidos pelo uso de um quebramar de enrocamento, a fórmula 20, usada para obter os resultados da Tabela 2, resulta de ensaios em que o quebramar é impermeável e a superfície dos taludes é lisa. No entanto, seria de esperar que os resultados obtidos através da aplicação da fórmula 20, referenciada pelo CEM, fossem superiores uma vez que o coeficiente de reflexão é, possivelmente superior, devido à forma de concepção do quebramar nos ensaios laboratoriais. Mesmo com a majoração do fator de incerteza, C_u , as profundidades de erosão são inferiores. Para além disso os resultados da Tabela 2 têm em consideração o fenómeno de rebentação das ondas.

No Anexo A e B estão representados vários quadros com a simulação da profundidade máxima de erosão através da aplicação, respetivamente, da fórmula 18 e 20 em função do período de pico T_p e da altura de onda H_d que por sua vez é função da profundidade de água, h , em frente ao quebramar ($H_s=0,78h$). O período varia de 6 a 12 segundos enquanto que a profundidade de água varia entre os 3 e os 9 metros. Foi feita uma análise para uma preia-mar de 4 metros (situação observada em Portugal Continental) e para uma preia-mar de 2 metros (situação observada no Brasil). Para além disso, fez-se o cálculo tendo em conta o fator de incerteza C_u , ou seja, utilizaram-se os seguintes valores para C_u : 0,66, 1,00 e 1,34.

É possível observar que os valores extremos da profundidade de erosão para a preia-mar de 4 metros são: (0,5 – 3,5), respetivamente uma profundidade de água de 3 e 9 metros. Já para uma preia-mar de 2 metros obtiveram-se os seguintes valores de extremo: (0,3 – 3,3) para as mesmas profundidades de água que a preia-mar de 4 metros.

Na Tabela 4 está apresentado um quadro resumo da formulação apresentada e respetivos critérios de aplicabilidade.

Tabela 4 – Resumo da Formulação para a previsão da profundidade máxima de erosão

Autor	Fórmula	Critérios de Aplicação
Herbich e Ko (1968)	$S_{Max} = \left(h - \frac{A}{2}\right) (1 - K_r) u_* 0,75 C_D \rho \left(\frac{\cot(\theta)}{d_{50}(\gamma_s - \gamma)}\right)^{\frac{1}{2}} - 1$	<ul style="list-style-type: none"> - Quebramares de Parede Vertical ou Taludes - Sem rebentação - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia fina
Fredsøe e Sumer (1997)	$\frac{S}{B} = 0,04 C_u [1 - e^{-4,0(KC-0,05)}]$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas irregulares - Quebramares de Taludes - Sem rebentação
Sumer e Fredsøe (1997)	$\frac{S}{H_s} = 0,01 C_u \left(\frac{T_p \sqrt{g H_s}}{h}\right)^{1,5}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas irregulares - Quebramares de Taludes - Com rebentação
Sumer e Fredsøe (2000)	$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}}$ $f(\alpha) = 0,3 - 1,77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right), \alpha \in [30^\circ; 90^\circ]$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas regulares - Quebramares de Taludes - Sem rebentação
Xie (1981)	$\frac{S}{H} = \frac{0,4}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas regulares - Quebramares de Parede Vertical - Sem rebentação - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia fina
	$\frac{S}{H} = \frac{0,3}{\left(\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right)^{1,35}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas regulares - Quebramares de Parede Vertical - Sem rebentação - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia grossa

Tabela 4 – Resumo da Formulação para previsão da profundidade máxima de erosão e suas restrições (Continuação)

Autor	Fórmula	Critérios de Aplicação
Song e Schiller (1973)	$\frac{S}{H_0} = 1,94 + 0,57 \ln\left(\frac{X}{X_b}\right) + 0,72 \ln\left(\frac{h}{L}\right)$ $0,5 < \frac{X}{X_b} < 1,0 \text{ (Powell, 1987)}$ $0,67 < \frac{X}{X_b} < 1,38 \text{ (Fowler 1996)}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas regulares - Quebramares de Parede Vertical - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia fina
Hughes e Fowler (1991)	$\frac{S_m}{(u_{rms})_m T_p} = \frac{0,05}{[\sinh(k_p h)]^{0,35}}$ $\frac{(u_{rms})_m}{g k_p T_p H_{m0}} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi \cosh(k_p h)} \left[0,54 \cosh\left(\frac{1,5 - k_p h}{2,8}\right) \right]$ $0,05 < k_p h < 3,0$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas irregulares - Quebramares de Parede Vertical - Sem rebentação - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia fina
Fowler (1992)	$\frac{S_{Max}}{H_0} = \left(22,72 \frac{d}{L_0} + 0,25 \right)^{\frac{1}{2}},$ $0,011 \leq \frac{d}{L_0} \leq 0,025$ $0,015 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0,040$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas irregulares ou regulares - Quebramares de Parede Vertical - com rebentação - Ângulo de incidência normal à estrutura - Com fundos constituídos por areia fina
Sumer e Fredsøe (1997)	$\frac{S_m}{B} = 0,5 C_u [1 - e^{-0,175 (KC-1)}]$	<ul style="list-style-type: none"> - Ondas regulares - Cabeça de Quebramares de Parede Vertical - Sem rebentação

2.4. PREVISÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE EROÇÃO – MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

A agitação marítima é caracterizada por eventos aleatórios onde alturas de onda e períodos variam ao longo do tempo. Devido a este facto, os métodos probabilísticos têm-se mostrado adequados para definição de alguns parâmetros que influenciam a estrutura como é o caso da profundidade da fossa de erosão, alturas de onda, etc.

Myrhaug *et al.*, (2004), citado por Bezerra (2008) procuraram definir uma metodologia para calcular a profundidade máxima da fossa de erosão junto à cabeça de estruturas marítimas. As expressões utilizadas neste método são as definidas por Sumer e Fredsøe (1997) e Fredsøe e Sumer (1997), respetivamente, expressões 13 e 18. Apesar destas expressões se aplicarem a onda regulares, Myrhaug *et al.*, (2004) aplicaram-nas a ondas irregulares uma vez que a profundidade de erosão é mais pronunciada no caso de ondas regulares. Este método baseia-se nas seguintes aproximações fundamentais:

1. Os parâmetros estatísticos não variam no tempo e a elevação da superfície livre segue uma distribuição de Gauss de banda estrita;
2. Cada onda é tratada de uma forma singular, ou seja, não são considerados os efeitos anteriores.

Considerando que as ondas de maior altura são as que agravam o processo erosivo e admitindo que o estado de agitação marítima atua durante um intervalo de tempo suficiente para que se atinja o estado da profundidade de erosão, s , as maiores ondas são representadas pela variável aleatória x com probabilidade de excedência $1/n$, $x_{1/n}$, onde x pode representar a amplitude do movimento orbital, A , a velocidade orbital junto ao leito, U_w , ou a altura de onda incidente, H . O valor médio esperado da profundidade máxima de erosão é dado por:

$$E \left[y(x) \middle| x > x_{\frac{1}{n}} \right] = n \int_{x_{\frac{1}{n}}}^{\infty} y(x) p(x) dx \quad (23)$$

em que $p(x)$ representa a função densidade de probabilidade da variável aleatória x .

A definição da amplitude do movimento orbital junto ao leito considera a teoria linear das ondas, assumindo como hipótese que a amplitude de onda é pequena em relação ao comprimento de onda. Assim o movimento elíptico das partículas de água pode ser definido segunda a seguinte expressão:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{z^2}{Z^2} = 1 \quad (24)$$

onde x representa a coordenada horizontal e z a coordenada vertical. A e Z resultam das seguintes expressões:

$$A = \frac{H \cosh(k + (z + h))}{2 \sinh(kh)} \quad (25)$$

$$Z = \frac{H \sinh(k + (z + h))}{2 \sinh(kh)} \quad (26)$$

em que A representa a amplitude do movimento orbital horizontal e Z a amplitude do movimento orbital vertical (Veloso Gomes, 1989). Uma vez que o assunto aqui tratado se refere a erosões localizadas, a profundidade orbital será analisada junto ao leito, ou seja, $z = -h$, o que conduz a um valor nulo da posição vertical, que segundo Myrhaug *et al.* (2004) resulta em:

$$A = \frac{H}{2 \sinh(kh)} \quad (27)$$

De uma forma mais simplista, Myrhaug *et al.* (2004) definiu a amplitude do movimento orbital como:

$$A = \frac{U_w}{\omega} \quad (28)$$

em que ω representa a frequência de onda:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (29)$$

Assim, através da aplicação das leis estatísticas e com a aplicação das fórmulas de Sumer e Fredsøe (1997) é possível estimar a profundidade máxima de erosão junto à estrutura com um maior grau de certeza.

A previsão por via estatística não é âmbito deste estudo pelo que o seu estudo não foi aprofundado.

2.5. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO

Como já foi referido anteriormente a diferença da erosão localizada entre um quebramar de parede vertical e um quebramar de taludes está relacionada com o coeficiente de reflexão.

Arneborg *et al.*, (1995), citado por Sumer e Fredsøe (2000), calcularam numericamente as profundidades de erosões como função do coeficiente de reflexão para uma inclinação do talude de 1:1,2. Através da aplicação das fórmulas 30 e 31 definidas empiricamente por Losada e Gimenez-Curto (1981) através de dados obtidos por Gunbak (1976 e 1979), Sumer e Fredsøe (2000) chegaram a um coeficiente de reflexão, K_r , de 0,32.

$$K_r = 1,35 (1 - \exp(-0,071 Ir)) \quad (30)$$

no qual Ir é o número de Iribaren definido por:

$$Ir = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}} \quad (31)$$

Para este valor do coeficiente de reflexão, ($K_r=0,32$), Arneborg *et al.*, (1995) simulou numericamente a erosão num quebramar obtendo uma relação $S/H=0,045$, valor semelhante ao obtido no trabalho de Sumer e Fredsøe (2000) que obtiveram uma relação $S/H=0,060$.

Herbich *et al.*, (1984), citado por Sumer e Fredsøe (2000), conduziram experiências em laboratórios para quebramares de paredes inclinadas. A inclinação das paredes variou de $\alpha=90^\circ$ a $\alpha=15^\circ$ e concluíram que a profundidade de erosão normalizada S/H foi aproximadamente a mesma para inclinações entre $\alpha=90^\circ$ a $\alpha=45^\circ$, argumentando que havia pouca diferença no coeficiente de reflexão. No entanto, também concluíram que a profundidade da fossa de erosão diminui com a redução da inclinação α .

Sumer e Fredsøe (2000) chegaram às mesmas conclusões supracitadas, contudo observaram que existia alguma discrepância em relação a alguns dos resultados obtidos por Herbich *et al.*, (1984), nomeadamente, a maioria das profundidades normalizadas S/H terem um valor superior no trabalho de Herbich *et al.* (1984) e o modelo utilizado por ambos os autores ser semelhante. Sumer e Fredsøe, (2000) justificaram esta diferença com o facto da parede inclinada no trabalho de Herbich *et al.*, (1984) ser de Plexiglas® em vez de uma estrutura de enrocamento.

2.6. INFLUÊNCIA DOS FUNDOS NO QUEBRAMAR

A Figura 17 compara dois perfis de erosão, um perfil que representa a sequência erosão-deposição no caso de um quebramar de talude em enrocamento assente sobre um fundo móvel e um outro perfil que representa a mesma estrutura mas assente sobre um fundo fixo. Ambos os perfis foram obtidos sob as mesmas condições de onda.

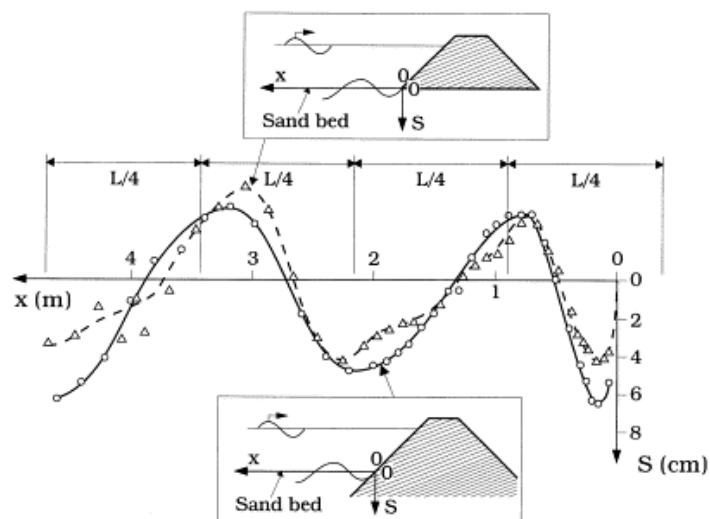


Figura 17 – Perfis dos fundos num quebramar de taludes (Sumer e Fredsøe, 2000)

Através da análise de ambos os perfis, Sumer e Fredsøe (2000) observaram que a erosão localizada no quebramar assente sobre fundos móveis era inferior a cerca de 30%. Isto pode estar relacionado com o facto de existir um deslizamento de enrocamento que por sua vez forma uma proteção ao quebramar, resultando em profundidades de erosão relativamente inferiores. Um outro fator que possa ter influenciado n esta diferença pode estar relacionado com o fluxo dentro do quebramar, onde é esperado não seja muito forte no caso do quebramar assente sobre um fundo móvel.

2.7. EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS FOSSAS DE EROSÃO

A partir da análise dimensional Sumer *et. al.*, (2005) expressaram a escala de tempo da seguinte forma:

$$T^* = f\left(\frac{h}{L}; \alpha; \theta; \frac{L}{d_{50}}; Re\right) \quad (32)$$

em que T^* é a escala de tempo adimensional que se define por:

$$T^* = \frac{[g(s-1)d_{50}^3]^{\frac{1}{2}}}{H^2} T_s \quad (33)$$

em que T_s é a escala de tempo, ou seja, o tempo durante a qual a erosão ocorre. Trabalhos anteriores realizados por Fredsøe *et al.*, (1992) e Sumer *et al.*, (1993) indicam que o parâmetro de Shields é também importante na análise temporal das fossas de erosão.

A Figura 18 representa o desenvolvimento da profundidade máxima de erosões em função do tempo. A Figura 18 (a) representa um caso de um quebramar de talude em enrocamento com uma inclinação de 1:1,2 sujeito à ação de ondas regulares, a Figura 18 (b) para uma inclinação de 1:1,7 e com ondas regulares e por fim a Figura 18 (c) representa um talude com inclinação de 1:1,2 sujeito à ação de ondas irregulares.

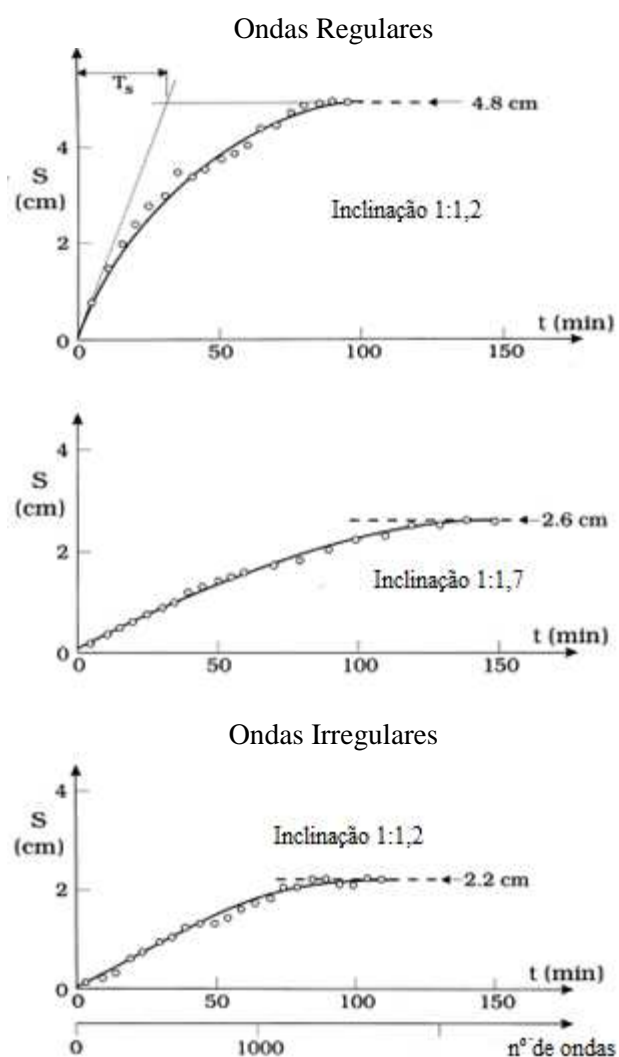


Figura 18 – Evolução temporal da profundidade máxima de erosão (Sumer e Fredsøe, 2000)

No trabalho de Sumer e Fredsøe (2000) é feita uma análise ao valor de T^* para três ensaios com características apresentadas Tabela 5, concluindo que T^* aumenta com a diminuição de H/L , isto porque com a diminuição da relação H/L a profundidade de erosões aumenta.

Tabela 5 – Análise da escala de tempo adimensional T^* (Sumer e Fredsøe, 2000)

Teste	h/L	Escala temporal T_s (min)	Nº de ondas	Escala de tempo adimensional T^*
3	0,078	33	800	3,3
8	0,060	85	1700	6,0
15	0,045	78	1200	15,8

2.8. SOLUÇÕES ESTRUTURAIS AO NÍVEL DAS RISBERMAS

As erosões localizadas são sem dúvida um dos principais mecanismos geradores de instabilidade de uma estrutura em taludes. Em função disto torna-se imprescindível definir metodologias de proteção de modo a prevenir possíveis danos. É importante que estas medidas preventivas sejam desde logo implementadas na fase de projeto uma vez que a sua aplicação após a construção da estrutura marítima acarretará custos superiores, não invalidando que seja mais vantajosa a implantação destas medidas após a construção do que a sua não implantação uma vez que a ausência destas medidas expõe a estrutura a um maior risco de rotura global.

Apesar de existir um número considerável de estudos, não existe ainda um consenso na comunidade da engenharia costeira acerca da melhor forma de proteger as estruturas marítimas, sendo que grande parte dos métodos baseiam-se na experiência de intervenções de sucesso (Bezerra, 2008).

A total proteção contra as erosões localizadas passa por efetuar a sua fundação num solo rochoso, como é o caso do quebramar destacado da Aguda, em que as condições geotécnicas permitiram este tipo de solução. No entanto, grande parte das estruturas marítimas não têm condições geotécnicas ou económicas para que a fundação da estrutura seja feita num solo rochoso. Como já foi referido, o coeficiente de reflexão é um dos principais fator que condicionam a profundidade de erosão junto a estas estruturas, onde maiores coeficientes de reflexão se traduzem em maiores profundidades de erosão. Assim, em estruturas de taludes, é aconselhável que o talude tenha uma inclinação suave de forma a diminuir quer o coeficiente de reflexão quer as profundidades máximas de erosão junto às estruturas. Contudo, esta solução levará a um aumento do volume de materiais necessários para a construção da estrutura e causa um impacte visual negativo podendo afetar a atratividade turística em que se insere a estrutura. Em detrimento do anteriormente referido, verifica-se uma evolução na inclinação dos talude em que inicialmente era comum o uso de taludes com inclinação de 1:1 e hoje em dia é regra comum projetar taludes com inclinações de 3:2 e 2:1. O aumento da inclinação faz com que o diâmetro da cabeça da estrutura aumente conduzindo à redução do valor de KC, podendo ser um efeito favorável neste aspeto. Uma outra forma de reduzir o coeficiente de reflexão passa por aumentar a rugosidade e a permeabilidade da estrutura. Assim haverá maior dissipação de energia uma vez que será maior a resistência da percolação de água nos vazios existentes entre os blocos e consequentemente aumentará os níveis de turbulência. A rugosidade aumenta a turbulência na superfície do talude diminuindo os efeitos do espraiamento e, principalmente, do refluxo na formação das fossas de erosão. Em taludes de enrocamento, este aumento da rugosidade passa pela colocação do enrocamento de uma forma desarranjada, Figura 19, no entanto esta solução provoca um efeito negativo ao nível visual podendo levar à não aceitação por parte da população (Velooso Gomes, 2013).

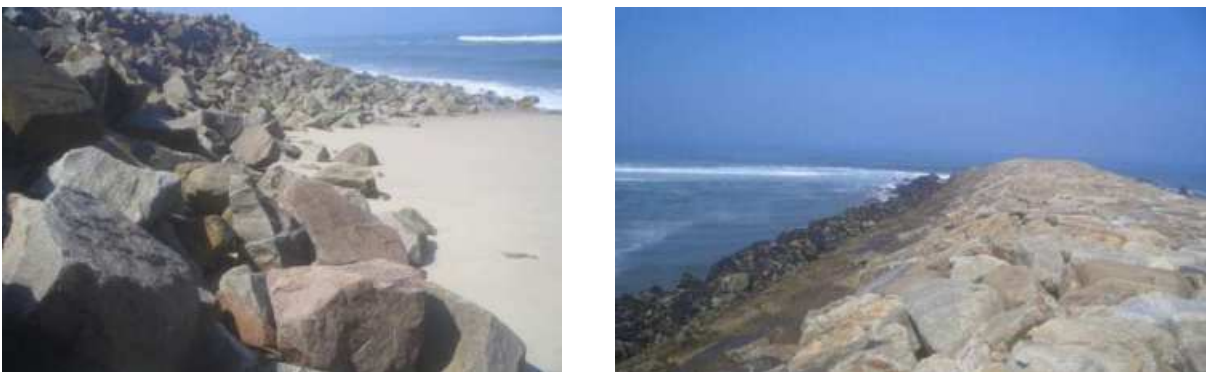


Figura 19 – Forma de colocação do enrocamento em obras marítimas em taludes

A melhoria do solo de fundação aluvionar é sem dúvida um aspeto importante na estabilidade da estrutura, evitando assim assentamentos significativos. Uma solução que tem em conta o melhoramento do solo de fundação é a dragagem de uma parte do solo de fundação aluvionar e o seu enchimento com enrocamento aumentando assim a resistência do solo de fundação. Esta solução apenas pode ser aplicável em algumas zonas. Para além disso, não existe uma metodologia de dimensionamento para este tipo de solução. Contudo, o ganho de estabilidade é uma realidade neste tipo de solução. Esta solução é aplicada em estruturas verticais, uma vez que estas não possuem a flexibilidade das estruturas em taludes.

A principal solução para prevenir a influência das erosões localizadas no comportamento da estrutura marítima passa pela colocação de uma risberma de proteção do pé de talude. Apesar da aceitação por parte da comunidade da engenharia costeira acerca da eficácia desta solução contra as erosões localizadas, ainda não existe um consenso generalizado acerca das características das risbermas, ou seja, ainda não existe uma metodologia aceite por toda a comunidade que defina cotas, comprimentos, pesos dos blocos e número de camadas da risberma, sendo ainda um pouco relativa a definição destes critérios.

Uma certeza existe, a risberma deverá ter um comprimento igual ao da fossa de erosão que se formaria caso esta não existisse. É esperado que esta solução resista tanto à ação da agitação marítima e seja flexível o suficiente para se moldar às alterações dos fundos.

Para além da erosão localizada num quebramar de taludes em enrocamento, Sumer e Fredsøe (2000) estudaram medidas de proteção de forma a evitar uma rotura do manto resistente devido a erosões localizadas. Desta forma foram realizadas dois tipos de experiências: a primeira composta uma risberma como proteção do manto resistente com apenas uma única camada de enrocamento, e uma outra experiência com várias camadas de enrocamento.

Assim, para ambas as experiências foram testados vários comprimentos de risberma l , e o perfil de equilíbrio erosões-deposições foi medido depois de removido todo o enrocamento da risberma.

Foi possível observar que a erosão não se verificava apenas na extremidade da risberma mas verificava-se também por baixo da risberma. Isto leva, obviamente, a um deslocamento do enrocamento da risberma de proteção do pé de talude.

A erosão localizada por baixo da risberma de proteção do pé de talude resulta da ação combinada de dois efeitos: as ondas agitam a areia debaixo da risberma e os sedimentos mais finos ficam em suspensão e a transmissão junto da risberma transporta esses sedimentos em suspensão. A conjugação destes dois fatores provoca assim erosão localizada debaixo da risberma e um reajustamento da risberma ao fundo.

A Figura 20 apresenta a profundidade de erosão debaixo da risberma de proteção. É possível verificar que a erosão é praticamente nula quando o comprimento da risberma, l , tem o mesmo comprimento que a largura da fossa de erosão.

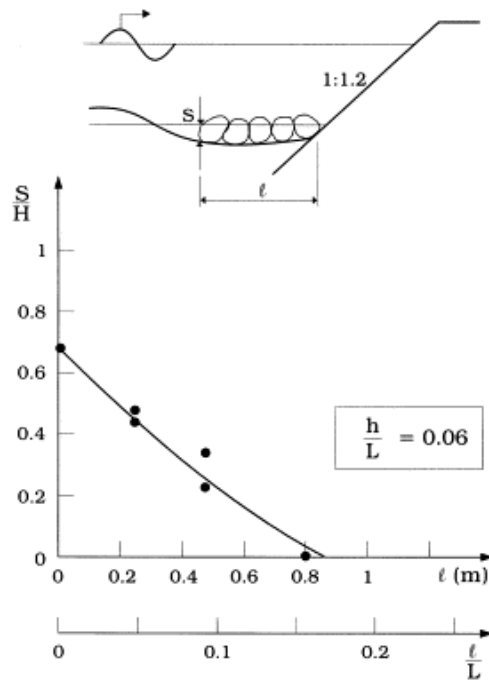


Figura 20 – Profundidade máxima de erosão em função do comprimento da risberma

Com isto, Sumer e Fredsøe (2000) recomendam que a largura da risberma de proteção com apenas uma camada deve ser igual à largura da fossa de erosão criada numa situação sem qualquer tipo de proteção.

Nos testes realizados com uma risberma com várias camadas (5 camadas), verificou-se que o enrocamento que formou a risberma foi preenchendo a fossa de erosão, formando assim um talude de proteção. É importante salientar que o preenchimento da fossa de erosão pelo enrocamento não se verificou ser feito de uma forma repentina, ou seja, o enrocamento preenchia a fossa de uma forma lenta e gradual, resultando num perfil semelhante ao observado na Figura 21.

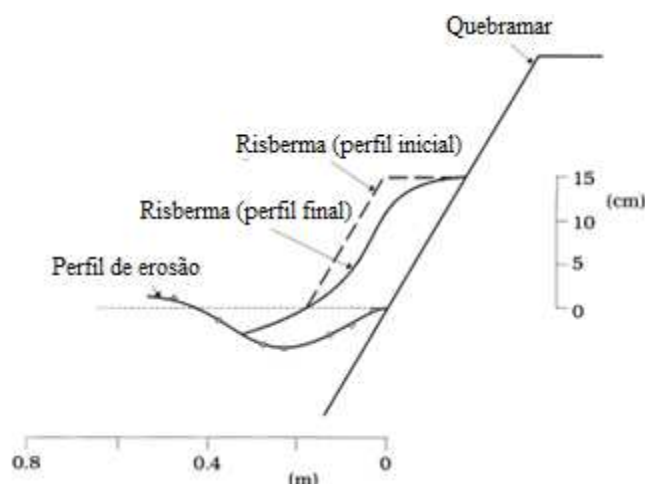


Figura 21 – Estado de equilíbrio da risberma após deslizamento do enrocamento

Sumer e Fredsøe (2000) realizaram um teste com um fundo fixo de forma a verificar se o movimento/reajustamento da risberma ao perfil se deve apenas ao fenómeno erosivo ou se é

condicionado pela agitação marítima. Com este teste concluíram que realmente a ação das ondas tem influência no movimento do enrocamento da risberma como pode ser observado na Figura 22.

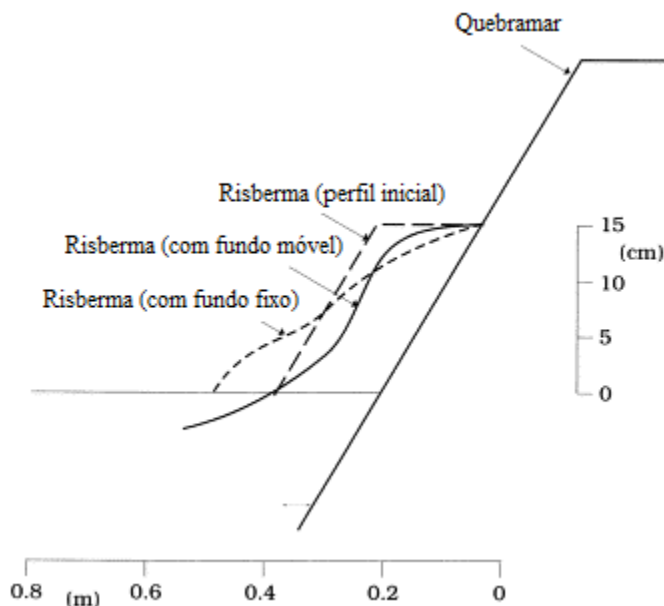


Figura 22 – Comparação do perfil de equilíbrio da risberma para diferentes formas de fundo

Foi também estudado a influência do número de camadas na profundidade de erosão e concluíram que quanto maior o número de camadas menor será a profundidade de erosão. No entanto, a partir de certo valor de número de camadas a profundidade de erosão mantém-se inalterada. Isto deve-se ao grau de “blindagem” que a risberma confere ao fundo na extremidade do quebramar. Na Figura 23 é possível verificar que a partir da quinta camada pouca influência terá o aumento de camadas no comportamento da risberma.

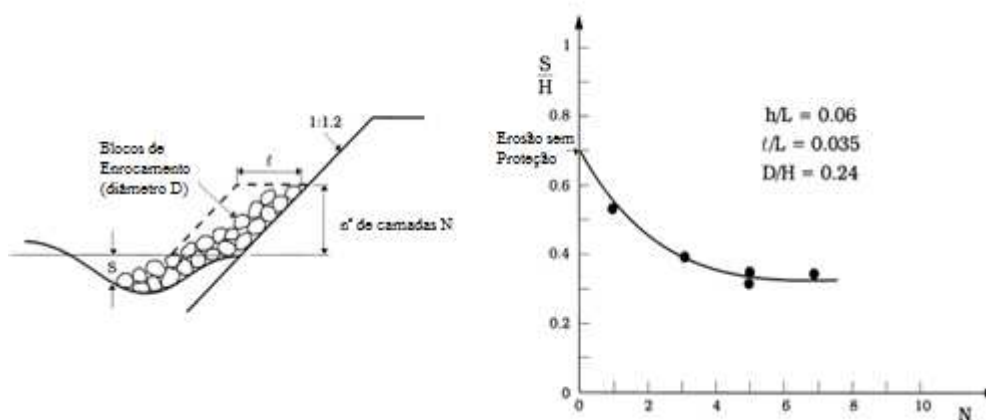


Figura 23 – Influência do número de camadas da risberma N na sua funcionalidade

O *Coastal Engineering Manual* descreve algumas técnicas construtivas, baseadas no trabalho de McConnell (1998) que podem ser adotadas para risbermas de estruturas marítimas aderentes e paralelas à costa, comumente denominadas de paredões. Na Figura 24 estão representadas algumas destas

técnicas construtivas sendo que no Anexo C estão representadas todas as técnicas apresentadas pelo CEM para este tipo de estruturas.

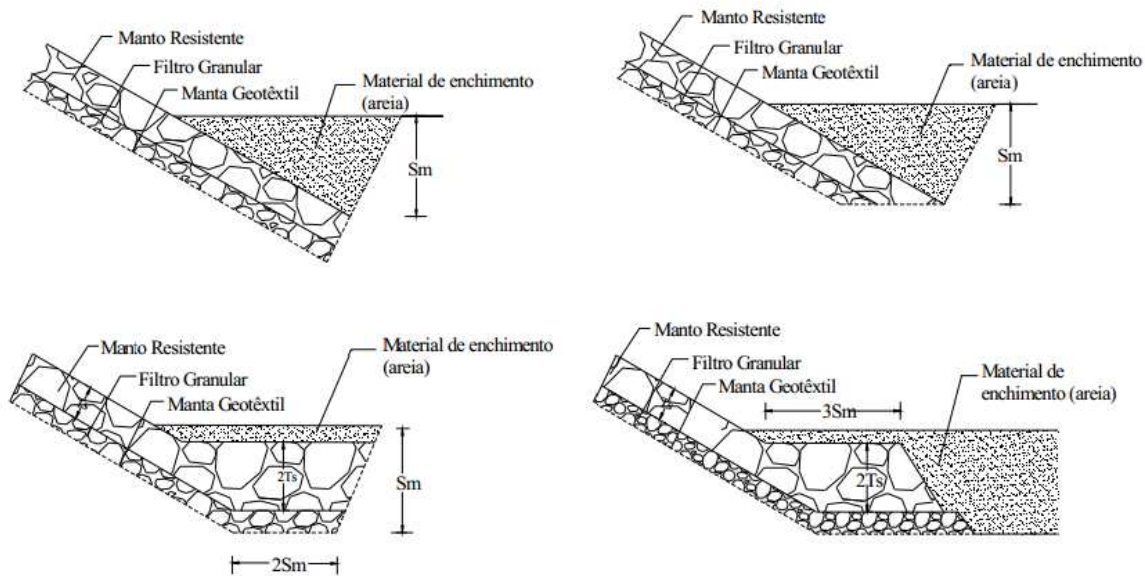


Figura 24 – Técnicas construtivas de risbermas em estruturas marítimas aderentes (CEM)

2.9. DIMENSIONAMENTO DE RISBERMA

Existem vários autores que estudaram este tipo de estrutura e definiram fórmulas empíricas de forma a dimensionar uma risberma.

Van der Meer (1995) realizou um trabalho sobre o dimensionamento de quebra-mares de taludes em enrocamento. Parte do seu trabalho deu ênfase ao dimensionamento de risbermas de proteção do pé de talude, referindo os trabalhos de Bredner e Donnelly (1962), Gravensen e Sorensen (1977), o relatório do CIAD (1985), o CUR/CIRIA (1991) e Gerding (1993).

Bredner e Donnelly (1962) testaram risbermas numa estrutura de paredes verticais com ondas monocromáticas e assumiram uma relação entre $\frac{h}{h_t}$ e o número de estabilidade $\frac{H_s}{\Delta Dn_{50}}$ (N_s) onde h_t representa a profundidade do topo da risberma e h a profundidade de água, Figura 25.

Uma relação pequena de $\frac{h_t}{h}$ (0.3 – 0.5) significa que a risberma é relativamente alta enquanto que uma relação de 0.8 significa que a risberma está próxima do fundo.

Por vezes é assumida uma relação entre $\frac{H_s}{\Delta Dn_{50}}$ e $\frac{h}{h_t}$ onde valores baixos de $\frac{h_t}{h}$ podem provocar maior dano devido à interação das ondas com a risberma. Gravensen e Sorensen (1977) mostraram que uma onda com grande declividade (período de onda curto) pode provocar maior dano que uma de menor declividade no entanto, o relatório do CIAD (1985) não verificou esta conclusão e nenhuma relação foi encontrada entre $\frac{H_s}{\Delta Dn_{50}}$ e $\frac{h}{h_s}$.

O Rock Manual (1991) fornece um novo gráfico de dimensionamento de risbermas baseada numa coleção de testes da Delft Hydraulics (DH) e Danish Hydraulics Institute (DHI), Figura 25. São definidas 3 classificações de danos: [0 - 3]% - sem movimento do enrocamento da risberma ou pouco movimento; [3 - 10]% - existe alguma movimentação considerável do enrocamento no entanto a risberma mantém-se estável; Rotura – a risberma torna-se instável e os danos não são aceitáveis.

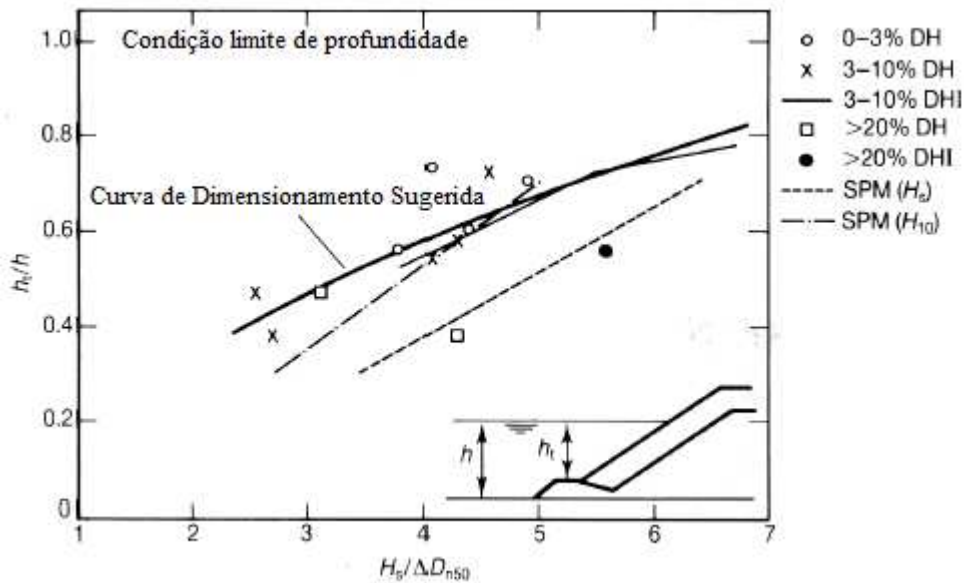


Figura 25 – Estabilidade da risberma em função da relação h_t/h

A linha de dimensionamento é dada no gráfico. Em geral, significa que a profundidade da risberma abaixo do nível da água é um parâmetro importante. Se a risberma está próxima do fundo o diâmetro do enrocamento pode ser duas vezes mais pequeno do que quando a risberma está a meio entre o fundo e o nível da superfície livre da água. Uma fórmula de dimensionamento para danos aceitáveis (3% – 10%) e situações de profundidade limitada é dada por:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n_{50}}} = 8,7 \left(\frac{h_t}{h} \right)^{1,4} \quad (34)$$

Uma pesquisa sobre estabilidade da risberma foi desenvolvida por Gerding (1993). Nesta pesquisa tentou estabelecer a influência da altura de onda, declividade de onda e profundidade da água com a estabilidade da risberma. Uma das principais conclusões foi que a declividade da onda não tem influência no dimensionamento da risberma. Com este trabalho concluiu que a profundidade da risberma pode ser definida por:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n_{50}}} = \frac{H_{2\%}}{1,4} = \left(\frac{0,24 h_t}{D_{n_{50}}} + 1,6 \right) N_{od}^{0,15} \quad (35)$$

$$D_{n_{50}} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (36)$$

Nod representa um parâmetro arbitrário em que:

- Nod=0.5 - significa que se iniciaram danos;
- Nod=2 - foram verificados alguns assentamentos;
- Nod=4 - os níveis de assentamentos verificados são consideráveis.

Estes valores de Nod são aplicáveis a risbermas com 3 – 5 blocos de largura e 2 – 3 blocos de altura.

Para risbermas largas, um nível de dano elevado pode ser aplicado antes do assentamento ocorrer. A equação anterior não tem nenhuma restrição na limitação da profundidade logo a profundidade h não é usada como um parâmetro. A influência da limitação do nível de água (maior onda de rebentação) pode ser tida em conta usando $H_{2\%}$ em vez de H_s . Uma aproximação pela segurança passa por usar H_s . A equação deve ser aplicada nos seguintes intervalos:

$$0,4 < \frac{h_t}{h} < 0,9$$

$$3 < \frac{h_t}{Dn_{50}} < 25$$

O *CEM* apresenta também um diagrama para o dimensionamento de risbermas representado na Figura 26 onde a curva 1 representa uma risberma de proteção em enrocamento em estruturas verticais fundadas em solos aluvionares, a curva 2 representa uma risberma de proteção composta por duas camadas para estruturas em taludes e por fim a curva 3 representa uma estrutura vertical fundada sob enrocamento

A Figura 26 apresenta uma relação entre $\frac{h_t}{h}$ e o número de estabilidade, N_s . Na Figura 26 estão representadas as curvas sugeridas para o dimensionamento de risbermas para três tipos de quebramares:

- Risberma de proteção em enrocamento em estruturas verticais;
- Risberma de proteção composta por duas camadas para estruturas em taludes;
- Fundação de enrocamento em estruturas verticais.

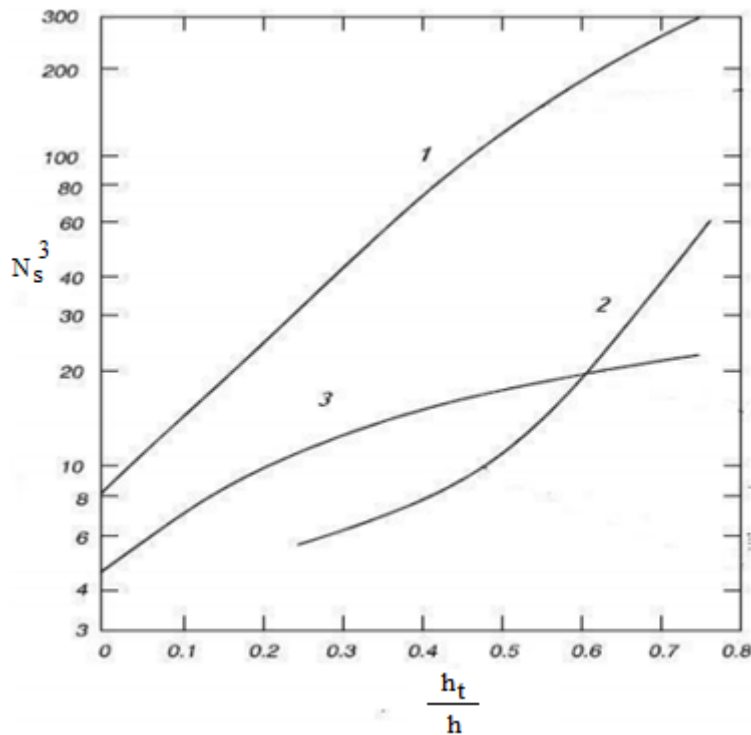


Figura 26 – Estabilidade da risberma de proteção

2.10. LIGAÇÃO AO CASO EM ESTUDO

O caso em estudo retrata uma estrutura em taludes em enrocamento aderente e paralelo à costa semelhante à obra de defesa costeira prevista para a praia de Ofir. Os principais aspetos a analisar nas séries de ensaio realizadas focam-se na observação do comportamento da risberma às erosões verificadas junto à estrutura e, conseqüentemente, o comportamento do manto resistente e coroamento. Foram testados vários cenários de forma a estudar o comportamento da estrutura às diferentes risbermas de proteção do pé de talude. Será também analisado o comportamento das diferentes risbermas às alterações do perfil dos fundos. Foram testadas risbermas com comprimento, alturas e diâmetros variados. Definiu-se um perfil-tipo da estrutura em estudo com as seguintes características à escala real:

- Cota do topo da risberma: 0,0 Z.H.
- Cota de coroamento: +8,0 Z.H.
- Cota dos fundos: -2,4 Z.H.
- Inclinação dos taludes: 3H:2V
- Manto Resistente: 2 camadas; intervalo de diâmetros [1,55; 1,84] m; intervalo de pesos [64,0; 106,7] kN
- Manto Secundário: 2 camadas; intervalo de diâmetros [0,70; 0,87] m; intervalo de pesos [6,0; 11,1] kN
- Núcleo – constituído por enrocamento de todo o tamanho (TOT)

Na Figura 27 está ilustrado o perfil-tipo dos ensaios laboratoriais com definição das características supracitadas.

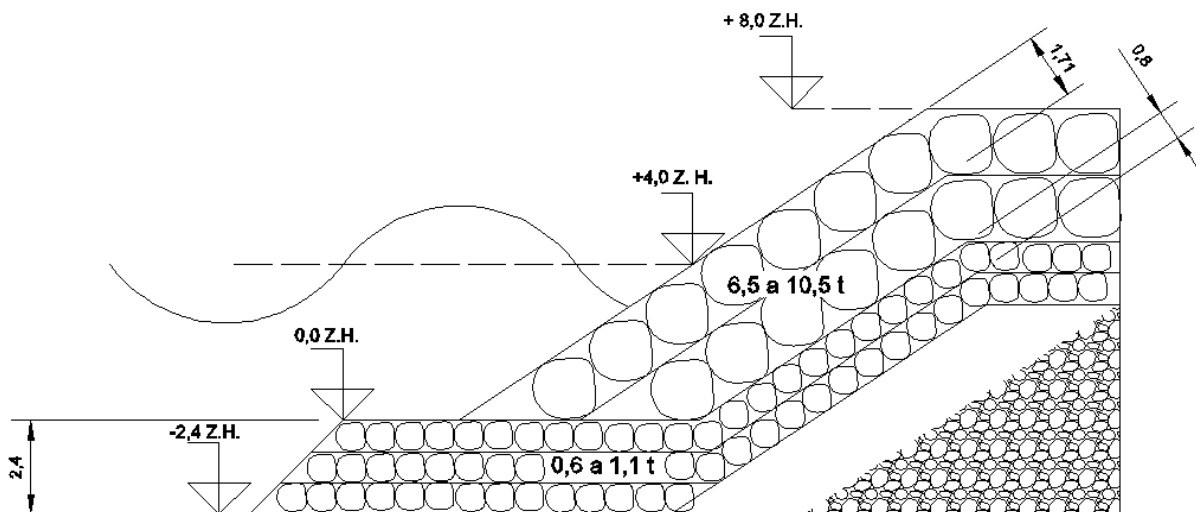


Figura 27 – Perfil-tipo dos ensaios laboratoriais

3 MODELO

3.1. SEMELHANÇA DE ESCALAS

É de esperar que o modelo seja o mais semelhante possível com o protótipo, o que implica respeitar a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Falhas aos níveis destas semelhanças conduzem a resultados que não são os reproduzidos no protótipo podendo levar assim a conclusões erradas acerca do caso em estudo. É importante ter a perfeita noção que é muito difícil recriar todos os fenómenos no modelo em simultâneo, simulando uma situação real. No caso da engenharia costeira esta recriação de fenómenos raramente é possível de se reproduzir num modelo reduzido devido à complexidade dos fenómenos envolvidos como são exemplo o fenómeno de rebentação, empolamento, refração, etc.

No entanto, existem leis de semelhança que reproduzem da forma mais próxima possível da realidade os fenómenos predominantes.

Esta semelhança pode ser obtida através de três métodos principais:

- Calibração: o modelo é calibrado a uma dada escala geométrica até que se obtenha uma reprodução dos dados medidos na realidade;
- Equações diferenciais: no caso das equações do processo serem conhecidas obtém-se a semelhança através da sua definição adimensional;
- Análise dimensional: este procedimento é usado para obter uma relação completa de parâmetros adimensionais a partir das variáveis do processo. Neste método é exigido que estes parâmetros se mantenham constantes.

O método da análise dimensional é o mais utilizado para a obtenção da semelhança.

A semelhança geométrica é geralmente condicionada pelas limitações físicas onde se instala o modelo. O modelo deve atender às relações de semelhança mas permitir uma construção e exploração económica, ser tecnicamente viável e ter dimensões razoáveis.

Em relação à semelhança dinâmica é possível associar as forças atuantes à respetiva semelhança mais adequada de forma a reproduzir no modelo essa mesma força:

- Semelhança de Froude: utilizada em escoamentos em superfície livre onde as forças de inércia são importantes face às forças gravíticas e em escoamentos em superfície livre puramente turbulentos (correntes oceânicas na zona costeira, estuários e zonas lagunares, correntes de maré, rebentação de ondas);

- Semelhança de Reynolds: aplicável no estudo da camada limite laminar e forças em objetos submersos com baixo número de Reynolds – Forças de viscosidade;
- Semelhança de Weber: quando existe predominância das forças de tensão superficial; interface entre dois fluidos de pequena espessura e bolhas de ar na coluna de água. A modelação segundo esta semelhança aumenta os efeitos da tensão superficial;
- Semelhança de Cauchy-Mach: aplicável quando as forças de compressibilidade são predominantes. Geralmente a água é considerada incompressível, exceto na determinação das forças numa estrutura causada pela compressão do ar confinado pela rebentação da onda. Outro exemplo da sua aplicabilidade é o dimensionamento de modelos estruturais para um corpo flutuante submetido a uma ação hidrodinâmica;
- Semelhança de Euler: aplicável quando as forças devido a variações de pressões são predominantes;
- Semelhança de Strouhal: aplicável em escoamentos não permanentes e oscilatórios.

Não é possível construir um modelo que cumpra dois critérios de semelhança em simultâneo. A Figura 28 apresenta a aplicabilidade dos critérios de semelhança no caso do estudo da interação de uma onda com uma estrutura marítima.

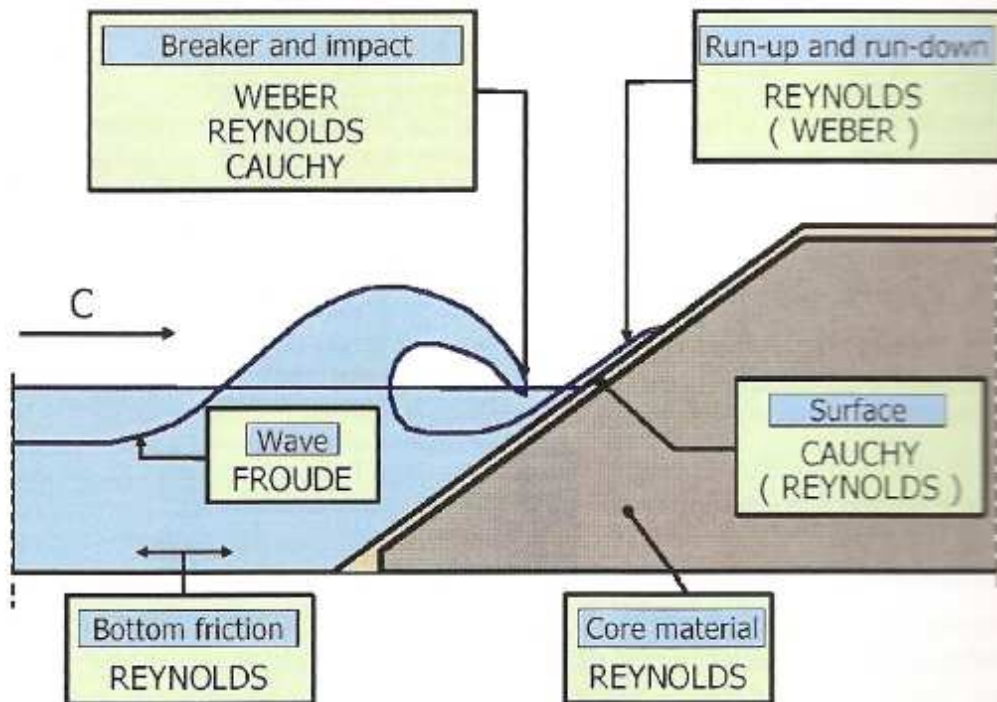


Figura 28 – Aplicabilidade dos critérios de semelhança de escalas

No caso em estudo a inércia e a força gravitacional são parâmetros fundamentais enquanto que a tensão superficial e viscosidade são parâmetros secundários. Assim, a aplicação da semelhança de Froude mostrou-se a mais adequada para o dimensionamento do modelo.

Na Tabela 6 estão representadas algumas das semelhanças de Froude mais importantes para o caso em estudo.

Tabela 6 – Principais critérios de semelhança de Froude

Parâmetros	Semelhança de Froude
Comprimento	N_L
Tempo	$N_t = N_L^{1/2}$
Velocidade	$N_u = N_L^{1/2}$

onde N_L representa a escala geométrica. O núcleo não respeitará a semelhança de escalas uma vez que o fluxo dentro do quebramar seria anulado caso a semelhança fosse respeitada. Assim, usou-se um diâmetro médio superior de forma a recriar o fluxo dentro do quebramar. Não se recorreu a qualquer método para a definição deste diâmetro.

3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS – CONCEÇÃO

A estrutura em estudo foi dimensionada para uma altura de onda $H_d = 3,12$ metros. Esta altura de onda de dimensionamento foi definida através do critério de rebentação, $H_d = 0,78d$, onde d representa a profundidade de água junto ao quebramar. Relativamente ao manto resistente e secundário o seu dimensionamento teve como base a fórmula de Hudson:

$$W = \frac{\gamma_r H_s^3}{K_D \left(\frac{\gamma_r - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \cot g \theta} \quad (37)$$

onde W é o peso dos blocos em kN, γ_r o peso volúmico do enrocamento, γ_w o peso volúmico da água e θ a inclinação do talude.

Para a determinação da dimensão dos blocos aplicou-se a seguinte fórmula:

$$e_\Delta = K_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

Pela aplicação da fórmula 37 e 38 obtiveram-se os seguintes resultados à escala real:

- Manto Resistente: $W_1 = 85,35$ kN; $e_{\Delta 1} = 1,71$ m
- Manto Secundário: $W_2 = 8,54$ kN; $e_{\Delta 2} = 0,79$ m

Uma vez que a estrutura é constituída por enrocamento o CEM recomenda um intervalo de valores para o peso, uma vez que não é possível a construção de uma estrutura marítima em enrocamento com um determinado peso específico do enrocamento. Assim, o CEM recomenda para o manto resistente uma variação do peso de $\pm 25\%$ e de $\pm 30\%$ para o manto secundário. Com isto obtiveram-se os seguintes intervalos de pesos e dimensões dos blocos do enrocamento:

- Manto Resistente: $W_1 = [64,01; 106,69]$ kN; $e_{\Delta 1} = [1,55; 1,84]$ m
- Manto Secundário: $W_2 = [5,97; 11,10]$ kN; $e_{\Delta 2} = [0,70; 0,87]$ m

No caso em estudo foram estudados dois tipos de risbermas. Primeiro foi realizada uma série de ensaios com uma risberma sendo esta o prolongamento do manto secundário. Uma segunda série foi realizada com uma risberma como sendo o prolongamento do manto resistente.

O cálculo detalhado do dimensionamento do protótipo e do modelo encontra-se, respetivamente, no Anexo D e E.

3.3. PROGRAMA DE ENSAIOS

Foram realizados três séries de ensaios. A primeira série é relativa ao modelo sem risberma e foi nomeada como Série de ensaios 0. Esta série de ensaios foi realizada com o intuito de aferir o modelo, ou seja, verificar se o estado do mar provocaria os efeitos esperados na estrutura. Esta série não tem um número de ensaios pré-definidos, o que significa que serão realizados vários ensaios alterando, se necessário, alturas de onda, período de onda, tipo de onda, nível de água e inclinação dos fundos até se encontrar uma conjugação destas características que provoque os efeitos esperados na estrutura. Nesta série de ensaios não serão retirados quaisquer tipos de dados, com exceção do último ensaio em que o modelo já está estabelecido e servirá de referência para as restantes séries de ensaio. A segunda série de ensaios está relacionada com o modelo com risberma de proteção do pé de talude como sendo o prolongamento da camada do manto secundário, nomeando-se esta série com Série de ensaios 1. Nesta série serão realizados 6 ensaios com diferentes dimensões da risberma de proteção do pé de talude, havendo uma conjugação de dois níveis de alturas e três comprimentos. Os dois níveis de alturas são correspondentes a duas e três vezes o diâmetro do enrocamento e os comprimentos variam em 1, 3 e 5 metros.

Por fim será realizada a série de ensaio 2 que corresponde ao modelo com risberma de proteção de talude como sendo o prolongamento do manto resistente. Assim como acontece na série de ensaios 1, também aqui serão testados 6 ensaios em que existem dois níveis de alturas e três níveis de comprimentos. As alturas neste caso, correspondem a uma e duas vezes o diâmetro do enrocamento e como o diâmetro dos blocos é superior, é compreensível a razão do número de fiadas ser inferior. Relativamente ao comprimento foram testados os mesmos comprimentos que na série 1.

Em suma, foram realizados três séries de ensaios totalizando 13 ensaios dos quais se obtiveram dados. Os ensaios realizados na série de ensaios 0, com exceção do último ensaio, não foram considerados. Apenas será feita uma análise genérica com base na observação do comportamento dos fundos e da estrutura.

Por forma a facilitar a compreensão das características dos ensaios foi atribuído um código a cada ensaio. Este código é composto por três algarismos espaçados por um ponto onde cada algarismo corresponde, respetivamente, à série de ensaios a que corresponde o ensaio, ao número de fiadas da risberma de proteção do pé de talude e ao comprimento da risberma. Por exemplo, quando é referido o ensaio do

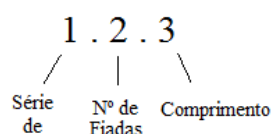


Figura 29 – Ilustração do formato do código atribuído aos ensaios

modelo 1 com risberma com duas fiadas e três metros de comprimento o código atribuído a este ensaio é representado pela Figura 29:

Na Tabela 7 é possível verificar o programa de ensaios e as principais características da estrutura e do estado do mar simulado.

Tabela 7 – Programa de Ensaios

Série de Ensaios	Ensaio	Dimensão Teórica do enrocamento da Risberma (m)	Nº Camadas Risberma	Altura da Risberma (m)	Comprimento da Risberma (m)
0	0		-	0	-
1	1.2.1	0,025	2	0,05	1
	1.2.3	0,025	2	0,05	3
	1.2.5	0,025	2	0,05	5
	1.3.1	0,025	3	0,075	1
	1.3.3	0,025	3	0,075	3
	1.3.5	0,025	3	0,075	5
2	2.1.1	0,053	1	0,053	1
	2.1.3	0,053	1	0,053	3
	2.1.5	0,053	1	0,053	5
	2.2.1	0,053	2	0,106	1
	2.2.3	0,053	2	0,106	3
	2.2.5	0,053	2	0,106	5

A altura de água no tanque, inclinação dos fundos, altura de onda, período e tempo de ensaio foram considerados os mesmos em todos os ensaios estando representados na Tabela 8.

Tabela 8 – Características da agitação marítima, inclinação dos fundos e tempo de ensaio

Altura de Água no Tanque (m)	Inclinação dos Fundos	Altura de Onda (m)	Período (s)	Tempo de Ensaio (minutos)
0,307	5:1	0,15	1,83	60

3.4. EQUIPAMENTO E MONITORIZAÇÃO

Os ensaios laboratoriais foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. O tanque de ondas é composto pelo tanque propriamente dito, um sistema gerador de ondas composto por dois grupos de pás, uma praia dissipadora de energia e uma cabine de controlo, Figura 30.

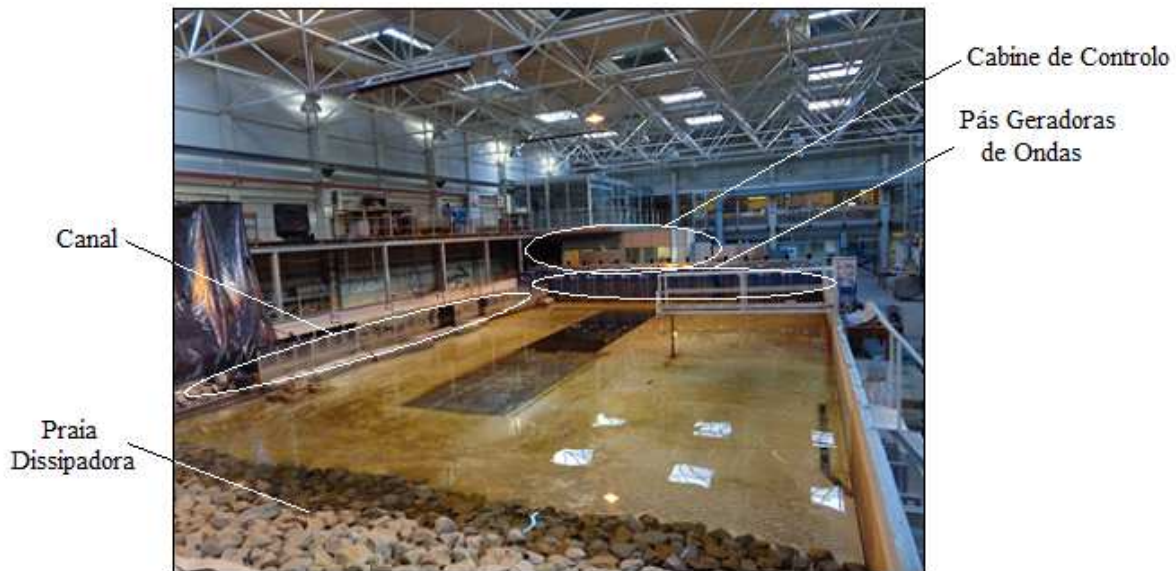


Figura 30 – Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O tanque tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1,2 m de altura. Dentro do tanque está acoplado o sistema gerador de ondas que é constituído por dois módulos de 8 pás. A movimentação das pás é feita através de motores elétricos e o seu funcionamento é feito de forma independente, possibilitando a criação de ondas com direções diversas através dos movimentos das pás em forma de “serpente”. O controlo do movimento das pás é feito pelo *software WaveMaker* localizado na cabine de controlo. Este *software* permite a criação de vários estados de agitação marítima sendo possível variar o tipo de onda (regular ou irregular), períodos de onda e alturas de onda. Relativamente à praia dissipadora de energia esta é constituída por um talude suave de enrocamento colocado de forma desordenada formando assim um talude rugoso e capaz de dissipar grande parte da energia das ondas evitando assim que os problemas de reflexão sejam significativos. Na zona anterior das pás existe também um sistema dissipador de energia composto por um material geossintético poroso para atenuar o efeito da reflexão (Santos, P., 2010). No tanque existe ainda um canal com largura de 0,80 m e comprimento de 18 m. A largura do canal corresponde, sensivelmente, à largura de uma só pá, desta forma o sistema gerador de ondas funcionará com uma só pá, gerando ondas apenas no canal. Os ensaios laboratoriais do presente trabalho foram realizados neste canal.

Relativamente aos sistemas de medição recorreu-se a três formas de análise: através de sondas de nível, velocímetros e registo do perfil dos fundos através da janela existente nas paredes do tanque. As sondas de nível permitem registar a amplitudes de onda em Volts (V) ao longo de todos os ensaios na forma de um gráfico, Figura 31.

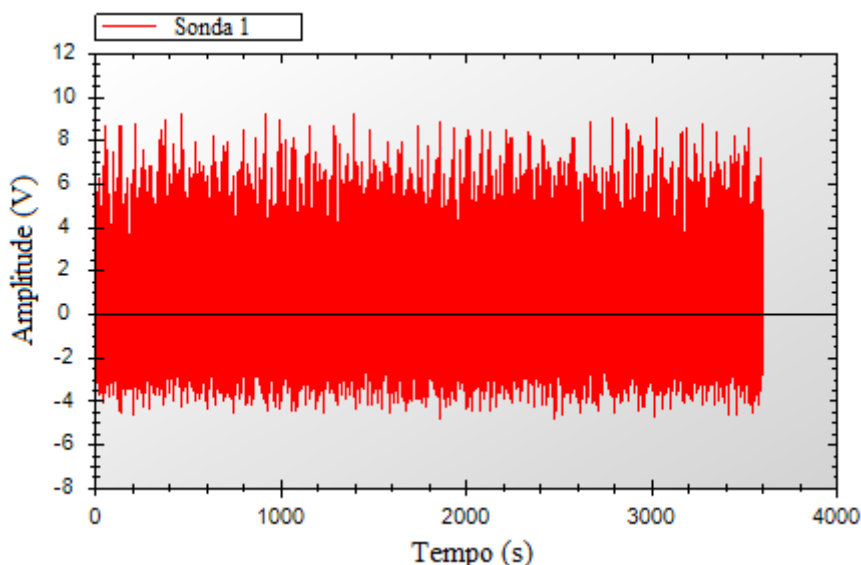


Figura 31 – Amplitude de onda registrada pelas sondas de nível hidrodinâmico

As sondas de nível, Figura 32-1 são controladas pelo *software* WaveData que para além de registar a amplitude do nível de água fornece também vários dados para análise do estado da agitação marítima. Os principais dados fornecidos por este *software* e relativos aos ensaios encontram-se no Anexo F.

O velocímetro *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) da Vectrino é um velocímetro acústico de alta resolução usado para medir a velocidade da água a 3D. A tecnologia de medição tem como base o efeito *doppler* que é caracterizado pela precisão dos resultados. Este aparelho também permite retirar distâncias, Figura 32-2. Assim, o ADV permitiu realizar dois tipos de análise: durante o ensaio foi registada a velocidade orbital a uma distância de 4 cm do fundo; no início e no fim do ensaio o ADV juntamente com o perfilador forneceu o perfil dos fundos. Foi necessário trabalhar com estes dois aparelhos em conjunto, Figura 32-3, uma vez que o perfilador não tinha alcance suficiente para atingir o fundo e desta forma retirar o perfil. Assim o perfilador teve a função de realizar os movimentos horizontais enquanto que o ADV media a distância ao fundo. Os dados fornecidos pelo ADV são controlados pelo *software* Vectrino Plus enquanto que o perfilador era controlado pelo Profiler da HRWallingford, respetivamente, Figura 32-4 e Figura 32-5.

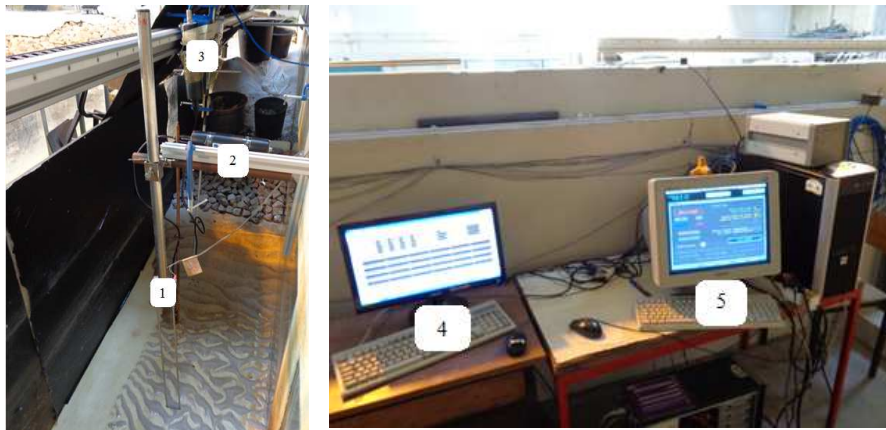


Figura 32 – Disposição das sondas no canal e *softwares* de registo e controlo das sondas

A cabine de controlo, Figura 33, é o local onde estão alojados os *softwares* responsáveis pela geração de ondas, ou seja, responsável pelo controlo do movimento das pás e o *software* responsável por receber e tratar os dados das sondas de nível hidrodinâmico.

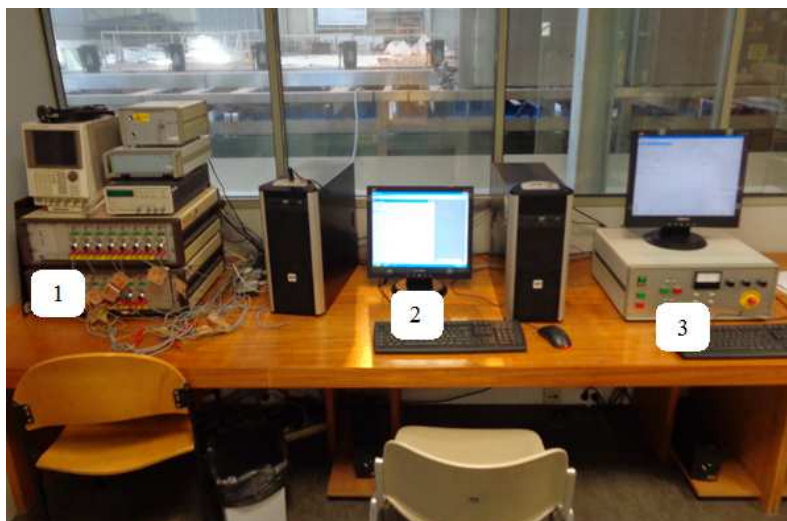


Figura 33 – Cabine de controlo do grupo gerador de ondas e sondas de nível hidrodinâmico

1 – Unidade de condicionamento de sinal – sondas de nível hidrodinâmico; 2 – PC de controlo do sistema de aquisição de dados da agitação marítima; 3 – PC de controlo do sistema de geração da agitação marítima.

O sistema de geração de ondas é composto por um conjunto de pás colocadas no interior do tanque de ondas que são controladas por um sistema informático onde está instalado o *software* (WaveMaker) capaz de transmitir informação às pás geradoras de ondas por forma a produzir o estado de mar pretendido. Estes sistemas informáticos encontram-se numa sala de controlo. A máquina de geração de ondas tem um comprimento de 12 metro (igual à largura do tanque) e é composta por dois módulos com 8 pás cada. A altura de onda máxima admissível é de 1 metro. A movimentação das pás é feita através de motores elétricos podendo trabalhar de forma independente.

O sistema de geração de ondas foi desenvolvido pela empresa HRWallingford, UK, e é controlado pelo *software* WaveMaker. Este sistema permite a geração de ondas regulares e irregulares.

A medição da elevação instantânea da superfície livre da água foi realizada através de sondas de níveis hidrodinâmicos. A calibração destas sondas é feita em águas paradas através da variação das profundidades de imersão relativamente ao nível previamente definido. O software HR WaveData possui um módulo destinado à calibração das sondas.

A medição da profundidade de erosão será realizada de duas formas: primeiro, durante o ensaio a medição será feita visualmente através da janela lateral do tanque com auxílio de uma régua e registo dos perfis numa folha de acetato. No final do ensaio, a profundidade de erosão no centro do canal foi medida através do ADV acoplado ao perfilador. O perfilador é composto por uma viga com uma carruagem por onde o aparelho se movimentará, uma sonda e os circuitos elétricos associados.

3.5. PROCEDIMENTO

Este trabalho laboratorial está dividido em três partes. Primeiramente realiza-se uma série de ensaios num modelo em que a risberma não está presente para desta forma aferir o comportamento da estrutura validando assim as condições de onda e danos espectáveis. Ao modelo associado a esta série de ensaios denominou-se Modelo 0. Depois de verificadas as condições favoráveis realizaram-se as restantes séries de ensaios sob as mesmas condições de onda aferidas no Modelo 0. Nesta série de ensaios já é testado o comportamento da estrutura para diferentes risberma de proteção do pé de talude sendo que neste modelo a risberma é constituída pelo prolongamento do manto secundário. Este modelo foi denominado Modelo 1. Por fim, é realizada a última série de ensaios relativa a uma risberma como sendo o prolongamento do manto resistente. O modelo associado a esta risberma denomina-se modelo 2.

Relativamente ao procedimento a seguir em cada ensaio, inicialmente é feito o perfilamento da estrutura e do fundo respeitando o perfil teórico pré definido e respetiva dimensão da risberma. De seguida, é retirado o perfil do fundo no centro do canal através do ADV e registado o perfil junto do vidro manualmente numa folha de acetato. Após o reperfilamento e do registo de perfis é possível gerar as ondas e ativar as sondas de nível hidrodinâmico e o ADV para registo da amplitude de onda e velocidade junto ao fundo, respetivamente. Durante o ensaio foi registado o perfil do fundo junto ao vidro em intervalos de 15 minutos de forma a analisar a evolução dos fundos. Por fim, os dados recolhidos pelas sondas de nível hidrográfico e pelo ADV são guardados para posterior análise e é retirado o perfil final do fundo no centro do canal através do ADV.

4

RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados e apresentada a análise feita com base na observação dos ensaios. Ao longo da realização da série de ensaios 0 foram feitas algumas recomendações a serem seguidas posteriormente de forma a anular os problemas encontrados. Nesta série foram realizados vários ensaios com o objetivo de encontrar as condições de agitação marítima que reproduzam os danos esperados.

4.1. TESTES

4.1.1. SÉRIE DE ENSAIOS 0 – TESTES DE AFERIÇÃO DE MODELO

Por vezes as condições de onda e concepção do modelo não atuam como esperado teoricamente, daí se realizarem uma série de testes num modelo de referência de forma a verificar se o comportamento conjunto entre a estrutura e as condições de onda são as esperadas para que desta forma o estudo seja realizado sob as condições previstas. Uma vez que o presente estudo incide sobre a análise da risberma é importante realizar um ensaio sem este órgão para assim reconhecer qual a sua influência numa estrutura marítima. Nesta série de testes será de esperar a ocorrência de erosões próximas da estrutura, provocando assim a rotura da estrutura. No entanto, verificaram-se problemas em encontrar as características de onda e modelo onde se verificassem tais erosões. Durante esta série alteraram-se algumas das características definidas no modelo inicial com o intuito de encontrar as condições desejáveis. As condições que se alteraram seguiram a seguinte ordem:

- Nível de água: 0,30 m; 0,25 m; 0,20 m;
- Altura de onda: 0,10 m; 0,15 m;
- Tipo de onda: regular ou irregular;
- Inclinação dos fundos: 20:1, 10:1 e 5:1;
- Período de onda: 1,83 s; 2,19 s.

A Tabela 9 apresenta um resumo das condições de cada ensaio relativo à série de ensaios 0.

Tabela 9 – Principais características da série de ensaios 0

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	1	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	20:1
	2	Irregular	0,10	1,83 s	0,25	20:1
	3	Irregular	0,15	1,83 s	0,25	20:1
	4	Irregular	0,10	1,83 s	0,20	20:1
	5	Irregular	0,10	2,19 s	0,20	20:1
	6	Irregular	0,10	1,83 s	0,20	10:1
	7	Regular/Irregular	0,15	1,83 s / 0,5 Hz	0,20	10:1
	8	Regular	0,15	0,5 Hz	0,20	10:1
	9	Regular	0,10	0,5 Hz	0,30	10:1
	10	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	10:1
	11	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	5:1
	12	Irregular	0,15	1,83 s	0,30	5:1
	13	Irregular	0,15	1,83 s	0,30	5:1

Ensaio 0.1

Tabela 10 – Característica do ensaio 0.1

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	1	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	20:1

No primeiro ensaio realizado sobre o modelo inicial verificaram-se alguns problemas de concepção o que levou a resultados inesperados. Ao longo do ensaio verificaram-se os seguintes aspetos:

- Manto: manteve-se estável ao longo de todo o ensaio sem se verificar qualquer movimentação ou remoção de blocos;
- Coroamento: verificaram-se galgamentos frequentes que provocaram erosões do lado de tardo de entre a crista e o tubo geossintético, levando ao desaparecimento da areia que preenchia essa zona, deslocando-se para o pé de talude da estrutura, Figura 34;
- Pé de talude: manteve-se estável tendo acumulado areia proveniente das erosões da massa de areia localizada no tardo de da estrutura devido aos galgamentos verificados e ao refluxo da onda; Figura 34 – esquerda;

- Envolvente da crista das ondas; verificou-se uma onda parcialmente estacionária próxima da estrutura com altura de 8 a 10 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: o talude manteve-se com uma inclinação de 20:1. Verificaram-se a criação de micro dunas espaçadas de 10 cm e altura média de cerca de 2 cm;
- Rebentação: verifica-se muito próxima da estrutura e diretamente sobre o manto sem que a zona do pé de talude sofra as solicitações esperadas.



Figura 34 – Perfil no início e no decorrer do ensaio 0,1

Verificaram-se assim alguns problemas no decorrer do ensaio e com isto definiram-se alguns procedimentos a seguir no ensaio seguinte de forma a contornar os problemas encontrados.

Procedimentos seguidos no ensaio seguinte: recarregou-se o coroamento e zona a tardoza com material granular de maiores dimensões de forma a evitar erosões devido a galgamentos; reperfilou-se o fundo de aproximação e removeu-se a areia acumulada no pé de talude; o nível médio da água foi rebaixado em 5cm (fixando-se a altura de água em 25cm) no sentido de forçar a rebentação junto ao pé de talude e diminuir os galgamentos.

Ensaio 0.2

Tabela 11 – Características do ensaio 0.2

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Periodo(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	2	Irregular	0,10	1,83 s	0,25	20:1

Depois de reajustado o modelo segundo a análise feita no primeiro ensaio alguns problemas continuaram a surgir:

- Manto: continuou estável no entanto, nos minutos iniciais, verificou-se uma movimentação bastante ativa na sua fundação;
- Coroamento (alterado): não sofreu alterações mostrando um bom comportamento aos poucos galgamentos verificados;

- Pé de talude: verificaram-se sinais iniciais de pequena erosão (linha azul) a que se seguiu um pequeno assoreamento ondulado, Figura 35;
- Envolvente da crista: ondas parcialmente estacionárias com altura entre 9,5 e 11cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: manteve-se o perfil do fundo com pequena alteração da posição das micro dunas em relação ao ensaio anterior;
- Rebentação: continua a verificar-se muito próxima da estrutura e diretamente sobre o manto.

Com a realização deste ensaio ainda não se verificaram as erosões esperadas no pé de talude conduzindo à instabilidade da estrutura sendo assim necessário realizar um novo ensaio.

Procedimentos seguidos no ensaio seguinte: aumentou-se a altura de onda significativa para 0,15 m criando solicitações mais exigentes no fundo de aproximação à estrutura.



Figura 35 – Perfil do fundo próximo ao pé de talude durante o ensaio 0.3

Ensaio 0.3

Tabela 12 – Características do ensaio 0.3

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Periodo(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	3	Irregular	0,15	1,83 s	0,25	20:1

Depois de ajustadas as condições de ensaio conforme as recomendações estabelecidas no final do ensaio 0.2 durante o decorrer do presente ensaio verificou-se:

- Manto: foi removido um bloco, no entanto, o manto continuou estável até ao fim do ensaio;
- Coroamento: sem qualquer alteração registada; não se verificaram galgamentos;
- Pé de talude: sem evolução significativa;
- Envolvente da crista das ondas: variação da altura entre 13,3 e 14,5 cm em relação ao nível médio da água;
- Perfil do fundo: pequena alteração da posição das micro dunas em relação ao ensaio anterior; verificou-se uma acumulação de areia junto à estrutura, Figura 36;
- Rebentação: continua-se a verificar uma situação idêntica ao ensaio anterior.

Os problemas continuaram a verificarem-se e novas alterações foram realizadas.

Procedimento seguido no ensaio seguinte: diminuir a altura de água com o mesmo objetivo do procedimento seguido no ensaio anterior.



Figura 36 – Perfil do fundo durante o ensaio 0.3

Ensaio 0.4

Tabela 13 – Características do ensaio 0.4

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	4	Irregular	0,10	1,83 s	0,20	20:1

Como definido no ensaio anterior reduziu-se a altura de água em 5 cm fixando-se a altura de água em 0,20 m. Com esta alteração seria de esperar que os fundos juntos à estrutura sofressem maiores solicitações por parte da agitação marítima, uma vez que a rebentação se verificou próxima da risberma. A análise retirada deste ensaio foi a seguinte:

- Manto: manteve-se estável ao longo de todo o ensaio, verificando-se apenas um bloco removido;
- Coroamento: manteve-se estável como seria de esperar uma vez que se reduziu o nível da água e os galgamentos foram nulos;
- Pé de talude: verificou-se acumulação de areia tornando assim o pé de talude estável, Figura 37;
- Envolvente da crista: variação da altura entre 11,5 e 12,7 cm em relação ao nível médio da água;
- Perfil do fundo: pequenas alterações na posição das micro dunas pouco significativas;
- Rebentação: grande parte da rebentação verifica-se diretamente sobre o manto, no entanto verifica-se a rebentação de algumas ondas sobre o pé de talude.

Os resultados não se aproximam dos esperados e novas alterações tiveram de ser implementadas.

Procedimento que se seguiu no ensaio seguinte: alterou-se o período de onda sem fazer qualquer alteração ao modelo de forma a verificar se este parâmetro reproduzia os resultados esperados.



Figura 37 – Perfil do fundo no final do ensaio 0.4

Ensaio 0.5

Tabela 14 – Características do ensaio 0.5

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) / Freqüência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	5	Irregular	0,10	2,19 s	0,20	20:1

Com a alteração do estado do mar através do aumento do período de onda para 2,19 s (correspondendo a um período de 12 s à escala real) verificaram-se os seguintes aspetos:

- Manto: continuou estável;
- Coroamentos: sem qualquer alteração verificada;
- Pé de talude: verificou-se uma deposição de areia ao longo de todo o pé de talude com uma altura de deposição com cerca de 2 cm;
- Envolvente da crista: semelhante ao ensaio anterior;
- Perfil do fundo: semelhante ao ensaio anterior;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior.

Esta solução não reproduziu os efeitos esperados teoricamente. Novos procedimentos tiveram de ser definidos. No final deste ensaio decidiu-se reduzir a inclinação do fundo, esperando-se reproduzir maior instabilidade no pé de talude.

Procedimento que se seguiu no ensaio seguinte: alteração da inclinação do fundo para 10:1.

Ensaio 0.6

Tabela 15 – Características do ensaio 0.6

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	6	Irregular	0,10	1,83 s	0,20	10:1

Com as novas alterações feitas ao perfil do ensaio anterior, nomeadamente, a alteração da inclinação dos fundos para 10:1 e repondo o período de onda estabelecido anteriormente verificaram-se os seguintes aspetos:

- Manto: verificaram-se movimentos de alguns blocos, no entanto, o manto continuou estável;
- Coroamentos: sem qualquer alteração verificada;
- Pé de talude: verificaram-se erosões na zona de transição manto resistente/manto secundário, Figura 38 – esquerda;
- Envolvente da crista: variação da altura entre 12,0 e 13,1 cm em relação ao nível medio da água;
- Perfil do fundo: verifica-se deposição imediatamente a seguir ao pé de talude com altura de deposição de 2 cm e um desenvolvimento de 20 cm, Figura 38 - direita. A deposição de sedimentos verificou-se contante ao longo do tempo;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior.

Com as alterações introduzidas continua a existir uma discrepância entre os resultados teóricos esperados e os resultados obtidos em laboratório, sendo assim necessário proceder a novas alterações.

Procedimento a seguir: aumentar a altura de onda de forma a aumentar as forças de rebentação, incrementado assim a solicitações tanto sobre o manto como sobre os fundos



Figura 38 – Erosões no pé de talude e acumulação de areia imediatamente a seguir à estrutura

Ensaio 0.7

Tabela 16 – Características do ensaio 0.7

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período(s) / Freqüência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	7	Irregular/Regular	0,15	1,83 s / 0,5 Hz	0,20	10:1

Neste ensaio procederam-se às alterações definidas no ensaio anterior por forma a verificar a conformidade entre o comportamento da estrutura com o esperado teoricamente. Assim, foi alterada a altura de onda para 0,15 m. Inicialmente, foram geradas ondas irregulares, no entanto durante o ensaio foi alterado o estado da onda para regulares uma vez que as ondas irregulares não produziram os efeitos pretendidos, para além disso as ondas regulares são, teoricamente, mais desfavoráveis, ou seja, criam fossas de erosão mais profundas. Com isto verificaram-se os seguintes aspetos:

- Manto: verificaram-se movimentos de alguns blocos no entanto o manto continuou estável;
- Coroamentos: sem qualquer alteração verificada;
- Pé de talude: verificaram-se erosões quando se utilizaram ondas regulares;
- Rebentação: verificou-se que a rebentação foi mais eficaz assumindo uma rebentação próxima da rebentação mergulhante, no entanto, verificou-se rebentação de ondas junto às pás geradoras de ondas, fazendo com que a onda perdesse alguma da sua energia, Figura 39.



Figura 39 – Rebentação de ondas junto à pá geradora de ondas

Como se verificaram erosões junto à estrutura aquando a utilização de ondas regulares, o próximo ensaio foi testado apenas com ondas regulares de forma a verificar se o comportamento da estrutura vai de encontro ao esperado. Apesar de se verificar rebentação de onda junto à pá geradora de ondas o próximo ensaio foi realizado com a mesma altura de onda que o presente ensaio.

Procedimento a seguir: realizar o ensaio com ondas regulares de forma a verificar se com estas condições os efeitos esperados inicialmente são reproduzidos.

Ensaio 0.8

Tabela 17 – Características do ensaio 0.8

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	8	Regular	0,15	0,5 Hz	0,20	10:1

Com a alteração das características das ondas de irregulares para regulares é esperado que a profundidade máxima de erosões seja maior, provocando assim uma fossa de erosão junto à estrutura que comprometa a sua estabilidade. Manto: verificaram-se movimentos de alguns blocos e um bloco foi removido;

- Coroamentos: sem qualquer alteração verificada;
- Pé de talude: verificaram-se erosões na transição manto resistente/manto secundário, Figura 40;
- Envolvente da crista: variação da altura entre 12,0 e 13,1 cm em relação ao nível médio da água;
- Perfil do fundo: verificou-se a criação de micro dunas; junto ao quebramar verificaram-se erosões significativas com cerca de 2 cm de profundidade, no entanto o fundo apresentava uma grande variação do seu perfil. Na Figura 40 é possível verificar a variação do perfil dos fundos junto à estrutura onde aos 15 minutos de ensaio se atingiu a profundidade máxima de erosão. No entanto após se atingir a esta profundidade verificou-se um processo de deposição;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior.

Procedimento a seguir: realizar um ensaio com as condições inicialmente definidas com alteração do tipo de ondas, ou seja, alteração de ondas irregulares para ondas regulares e mantendo a inclinação dos fundos de 10:1. Definiu-se uma frequência de onda de 0,5 Hz. O insucesso dos resultados pode estar relacionado com a existência de areia no tardo da estrutura, desta forma foi colocada uma placa de madeira no tardo evitando a possível existência de fluxo entre a estrutura e a massa de areia que se encontra no tardo que possa estar a transportar sedimentos para o pé de talude através do manto onde o grande volume de vazios potencializa o transporte desses sedimentos.

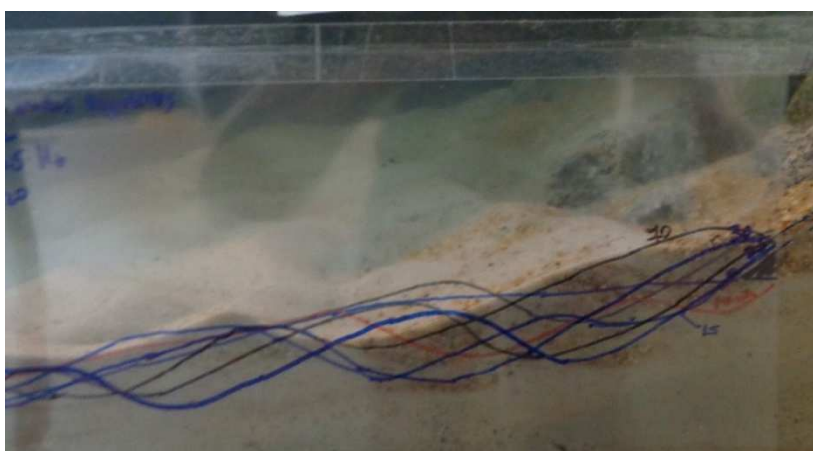


Figura 40 – Perfil do fundo no final do ensaio 0.8

Ensaio 0.9

Tabela 18 – Características do ensaio 0.9

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) / Freqüência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	9	Regular	0,10	0,5 Hz	0,30	10:1

Na Figura 41 - direita é possível verificar a forma como a placa foi colocada no tardo da estrutura para evitar a presença de fluxo entre a estrutura e a areia. Neste próximo ensaio verificou-se qual a influência da colocação da placa, da alteração de ondas irregulares para ondas regulares e da inclinação do fundo em relação ao perfil inicialmente definido. Com isto verificaram-se os seguintes aspectos:

- Manto: verificaram-se movimentos e remoção de 3 blocos, no entanto o manto continuou estável;
- Coroamentos: verificaram-se assentamentos e movimento de blocos;
- Pé de talude: verificaram-se erosões significativas que por sua vez provocaram um assentamento do manto, Figura 41 – direita;
- Perfil do fundo: verificou-se a formação de micro dunas e de uma fossa de erosão junto à estrutura com profundidade máxima de erosão de 3,5 cm. Os fundos apresentam uma variância do seu perfil ao longo do tempo, Figura 41 – esquerda;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior

Procedimento seguido no ensaio seguinte: sem realizar qualquer alteração ao perfil final do presente ensaio, realizou-se um ensaio com ondas irregulares de forma a verificar a evolução dos fundos junto à estrutura e o comportamento do manto, uma vez, que com ondas irregulares verificam-se alturas de ondas superiores que possam potencializar a instabilidade na estrutura.



Figura 41 – Perfil do fundo (à esquerda) e tardo da estrutura (à direita)

Ensaio 0.10

Tabela 19 – Características do ensaio 0.10

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	10	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	10:1*

*sem reperfilamento dos fundos relativo ao ensaio anterior

No seguimento do ensaio anterior e realizados as alterações definidas anteriormente verificaram-se os seguintes aspetos:

- Manto: verificaram-se maiores movimentações de blocos sendo que 8 blocos foram removidos do manto, tornando a estrutura instável na zona de rebentação;
- Coroamento: verificaram-se assentamentos e movimento de blocos no entanto continuou estável. Verificaram-se galgamentos frequentes;
- Pé de talude: verificou-se acumulação de sedimentos;
- Perfil do fundo: continua-se a verificar uma variação do perfil dos fundos; neste ensaio verificou-se uma deposição de sedimentos junto à estrutura, Figura 42;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior.

Procedimento seguido no ensaio seguinte: fazer nova alteração da inclinação dos fundos para 5:1 esperando que se verifique a formação de uma fossa de erosão junto à estrutura e que, conseqüentemente, provoque instabilidade do manto.

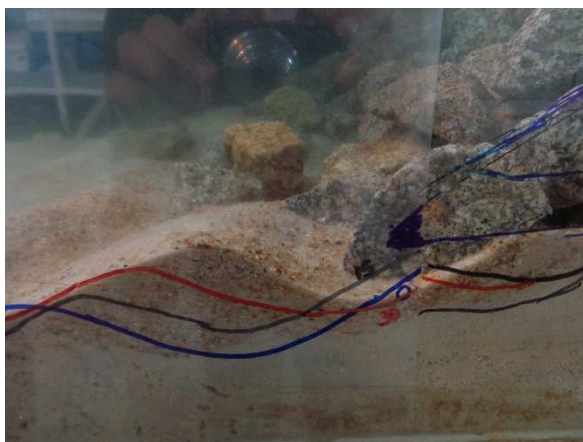


Figura 42 – Perfil do fundo durante o ensaio 0.10

Ensaio 0.11

Tabela 20 – Características do ensaio 0.11

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	11	Irregular	0,10	1,83 s	0,30	5:1

Em comparação com o perfil inicialmente definido, este ensaio apenas difere na inclinação dos fundos em que se alterou de uma inclinação de 20:1 para 5:1. Assim, com esta alteração verificou-se o seguinte:

- Manto: verificou-se um assentamento significativo que por sua vez provocou movimentação de blocos; foram removidos 12 blocos do manto, mais concretamente na zona de rebentação, tornando assim a estrutura mais vulnerável à ação das ondas. O manto deslizou cerca de 2 cm;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento do manto, levando a que alguns blocos ficassem mais expostos à ação das ondas;
- Pé de talude: verificou-se grande atividade hidrodinâmica provocando erosões que, conseqüentemente, conduziu ao assentamento do manto, Figura 43 – esquerda;
- Perfil do fundo: formaram-se micro dunas espaçadas de 11,5 cm e uma altura de 3,7 cm. Verificaram-se erosões junto à estrutura, no entanto a queda de blocos acumulou-se junto à estrutura formando assim uma risberma de proteção do pé de talude, Figura 43 – direita;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior.



Figura 43 – Perfil do fundo, blocos deslocados e removido do manto no ensaio 0.11

Com este ensaio ainda não se alcançaram os resultados esperados, no entanto, os resultados obtidos aproximam-se dos esperados.

Procedimento seguido no ensaio seguinte: sem fazer o reperfilamento do presente ensaio, realizar um novo ensaio com uma altura de onda maior de forma a verificarem-se maiores danos na estrutura.

Ensaio 0.12

Tabela 21 – Características do ensaio 0.12

Série de Ensaio	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Período (s) / Freqüência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	12	Irregular	0,15	1,83 s	0,30	5:1

Realizadas as alterações anteriormente definidas relativas à altura de onda verificou-se o seguinte:

- Manto: verificaram-se grandes movimentações de blocos e inclusive alguns blocos foram removidos;
- Coroamento: verificou-se movimentação de blocos;
- Pé de talude: verificaram-se maiores erosões e assentamentos;
- Perfil do fundo: o perfil dos fundos não sofreu alterações significativas;
- Rebentação: semelhante ao ensaio anterior;

Os resultados observados neste ensaio aproximam-se dos resultados esperados, apesar de não se verificar uma rotura parcial do manto como seria de esperar. Assim, as condições de onda e inclinação dos fundos testados no presente ensaio serão os definidos para os ensaios com risberma. Um novo ensaio foi realizado sem risberma e com as mesmas condições que o presente ensaio uma vez que neste ensaio não foi realizado o reperfilamento quer do fundo quer da estrutura.

Ensaio 0.13

Tabela 22 – Características do ensaio 0.13

Série de Ensaios	Ensaio	Tipo de onda	Altura de onda (m)	Periodo(s) /Frequência (Hz)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
0	13	Irregular	0,15	1,83 s	0,30	5:1

Este ensaio foi realizado com as mesmas condições que o ensaio anterior, no entanto, os fundos e o manto foram reperfilados. Este ensaio será o ensaio de referência para os próximos ensaios que terão risberma. A partir deste ensaio é apresentado, em forma de gráfico o perfil inicial (a azul) e final (a vermelho) no centro da estrutura. A partir deste ensaio todos os ensaios tiveram uma duração de 60 minutos.

Assim, após a realização deste ensaio verificou-se o seguinte:

- Manto: verificaram-se rolamentos dos blocos junto ao pé de talude provocando deslizamento dos blocos que os sobrepõem. Foram removidos 17 blocos que se alojaram junto à estrutura criando uma risberma de proteção do pé de talude, Figura 44;
- Coroamento: verificaram-se galgamentos frequentes; pequeno deslizamento verificado devido às erosões verificadas no pé de talude que provocaram deslizamento do manto e, consequentemente, deslizamento do coroamento;
- Pé de talude: grande atividade de erosão que provocou o deslizamento do manto;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 11 a 15 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: criação de micro dunas; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude que preencheram essa mesma fossa, Figura 45;

- Rebentação: forte; as ondas com maior altura por vezes rebentam a meio caminho do canal, no entanto têm energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

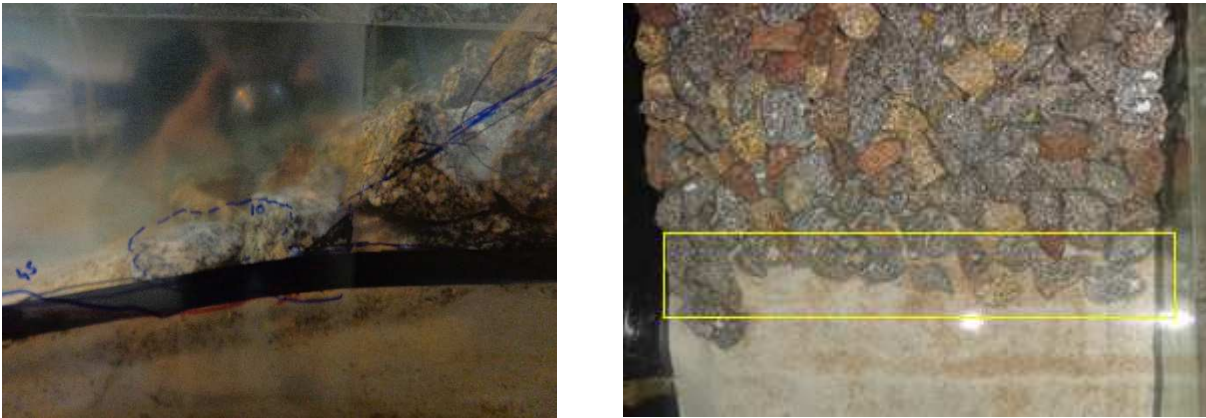


Figura 44 – Perfil do fundo (à esquerda) e blocos removidos e deslocados do manto (à direita)



Figura 45 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 0 (dimensões em cm)

4.1.2. SÉRIE DE ENSAIOS 1

A série de ensaios 1 representa a série de ensaio sobre o modelo 1. O modelo 1 apresenta uma risberma como sendo o prolongamento do manto secundário, assim como mostra a Figura 46. Nesta série, a risberma assumiu dois níveis de altura, um primeiro nível com altura correspondente a duas fiadas de enrocamentos e um segundo nível correspondente a três fiadas de enrocamento. Para além disso, para cada um destes níveis de altura foram ensaiados três comprimentos diferentes (1, 3 e 5 metros).

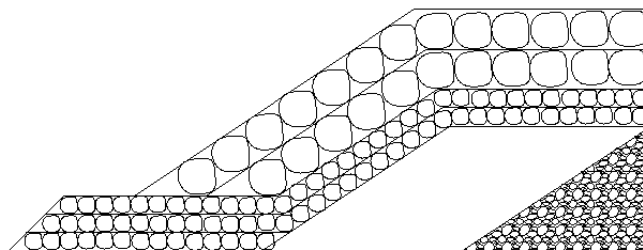


Figura 46 – Perfil tipo da série de ensaios 1

A Tabela 23 apresenta um resumo das principais características das risbermas e estado do mar a que o modelo 1 foi sujeito.

Tabela 23 – Principais características da série de ensaios 1

Série de Ensaios	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	2	1	1.2.1	0,30	1,83	0,30	5:1
	2	3	1.2.3	0,30	1,83	0,30	5:1
	2	5	1.2.5	0,30	1,83	0,30	5:1
	3	1	1.3.1	0,30	1,83	0,30	5:1
	3	3	1.3.3	0,30	1,83	0,30	5:1
	3	5	1.3.5	0,30	1,83	0,30	5:1

Ensaio 1.2.1

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0.050 m correspondente ao prolongamento de duas fiadas de enrocamentos do manto secundário e com comprimento de 1 metro.

Tabela 24 – Características do ensaio 1.2.1

Série de Ensaios	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	2	1	1.2.1	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: adaptou-se aos assentamentos verificados pela risberma tornando assim o manto mais suscetível à ação das ondas. Verificou-se movimentação de blocos sendo que 11 blocos foram removidos;

- Risberma: adaptou-se às erosões verificadas assumindo um talude aproximadamente igual ao do manto resistente. A risberma assentou 1,5 cm;
- Coroamento: verificou-se um assentamento de 0,5 cm. Alguns dos blocos foram removidos;
- Pé de talude: pouca atividade verificada. Pequena deposição de sedimentos com 2 cm de espessura, Figura 48;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 15,5 a 12,7 cm acima do nível médio da água
- Perfil do fundo: formaram-se micro dunas espaçadas 12,0 cm e uma altura de 2,5 cm; observou-se a criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude que preencheu essa mesma fossa;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade;

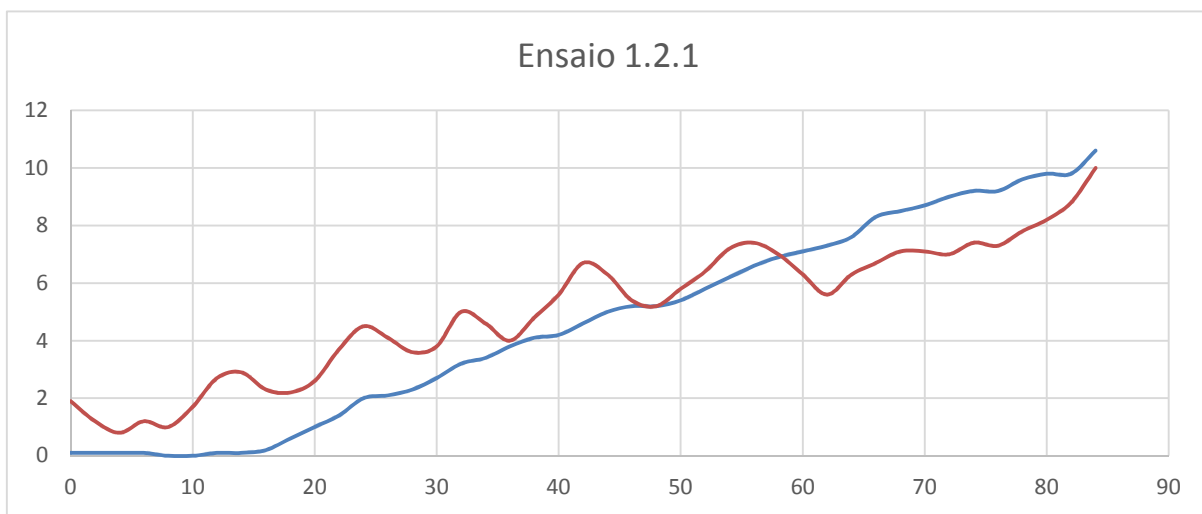


Figura 47 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.1 (dimensões em cm)



Figura 48 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma do ensaio 1.2.1

Ensaio 1.2.3

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0.05 m correspondente ao prolongamento de duas fiadas de enrocamento do manto secundário e com comprimento de 3 metros.

Tabela 25 – Características do ensaio 1.2.3

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	2	3	1.2.3	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: verificou-se um bom comportamento do manto às ações das ondas, sem se observar movimentos significativos dos blocos. Apenas se registaram dois blocos removidos;
- Risberma: boa flexibilidade na adaptação às erosões registadas, havendo um assentamento de 3,5 cm. Devido a este assentamento os blocos da risberma deslizaram para a fossa de erosão localizada imediatamente a seguir à estrutura formando assim um talude de pequena inclinação, Figura 49;
- Coroamento: verificou-se um pequeno assentamento de 0,3 cm. Nenhum dos blocos foi removido;
- Pé de talude: atividade pouco significativa registada. Sem fenómenos de erosão verificados;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 14,5 a 13,5 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 11,5 cm e uma altura de 2,2 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

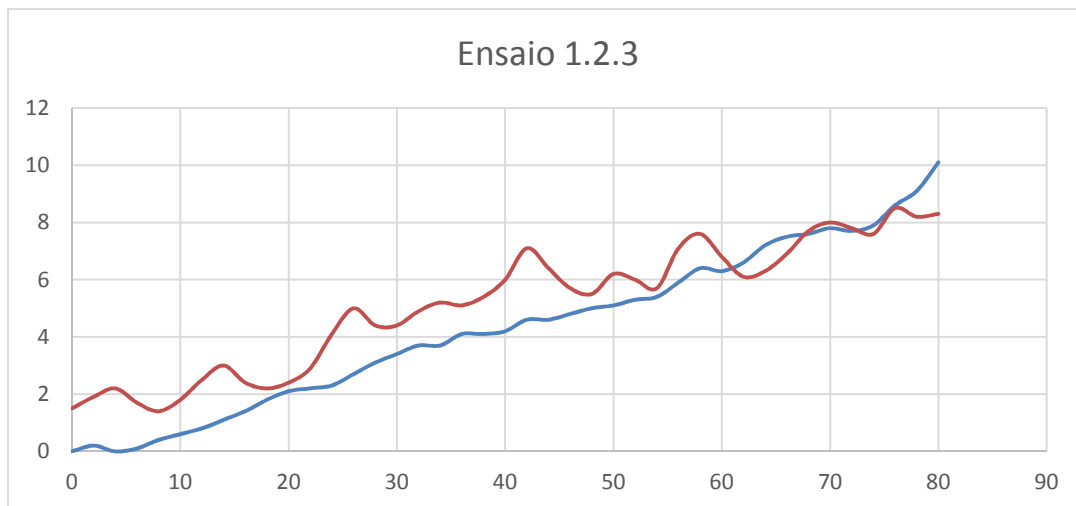


Figura 50 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.3 (dimensões em cm)



Figura 49 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.2.3

Ensaio 1.2.5

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,05 m correspondente ao prolongamento de duas fiadas de enrocamento do manto secundário e com comprimento de 5 metros.

Tabela 26 – Características do ensaio 1.2.5

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	2	5	1.2.5	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: verificou-se um bom comportamento do manto às ações das ondas, sem se observar movimentos significativos dos blocos. Apenas se registaram dois blocos removidos. Não foram observados assentamentos;

- Risberma: boa flexibilidade na adaptação às erosões registadas, havendo um assentamento de 2,6 cm. Devido a este assentamento os blocos da risberma deslizaram para a fossa de erosão localizada imediatamente a seguir à estrutura formando assim um talude de pequena inclinação, Figura 52;
- Coroamento: sem assentamentos observados. Movimento de blocos pouco significativos;
- Pé de talude: alguma atividade observada levando à deposição de sedimento com espessura de 2,7 cm na zona de transição manto/risberma;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 15,7 a 12,8 cm acima do nível médio da água
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 11,5 cm e uma altura de 3,5 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

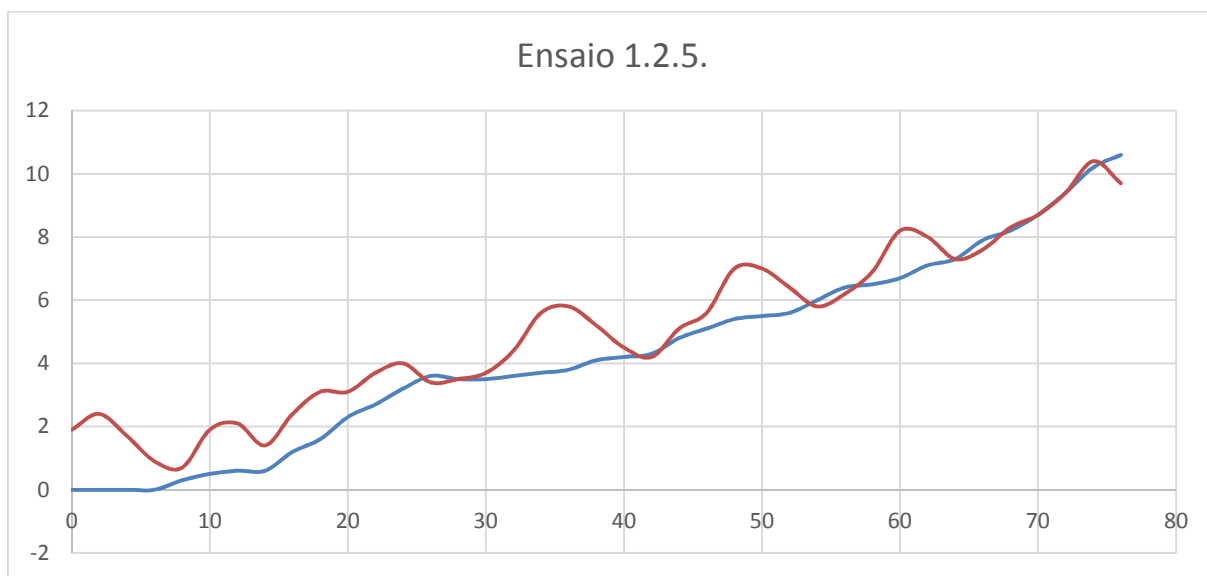


Figura 51 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.2.5 (dimensões em cm)



Figura 52 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.2.5

Ensaio 1.3.1

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,075 m correspondente ao prolongamento de três fiadas de enrocamentos do manto secundário e com comprimento de 1 metro.

Tabela 27 – Características do ensaio 1.3.1

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	3	1	1.3.1	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: verificaram-se assentamentos significativos com cerca de 2,5 cm e um deslizamento de 1,2 cm. Alguma movimentação de blocos observadas. 8 blocos foram removidos;
- Risberma: adaptou-se às erosões verificadas assumindo um talude com inclinação aproximadamente igual ao do manto resistente. O assentamento da risberma provocou, consequentemente, um assentamento do manto;
- Coroamento: verificou-se um assentamento de 2,0 cm. Alguns dos blocos foram removidos, Figura 54;
- Pé de talude: pouca atividade verificada no entanto verificou-se uma acumulação de areia com altura de 1,3 cm;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 16,0 a 13,0 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 13,0 cm e uma altura de 2,6 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude que preencheu essa mesma fossa;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto, tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

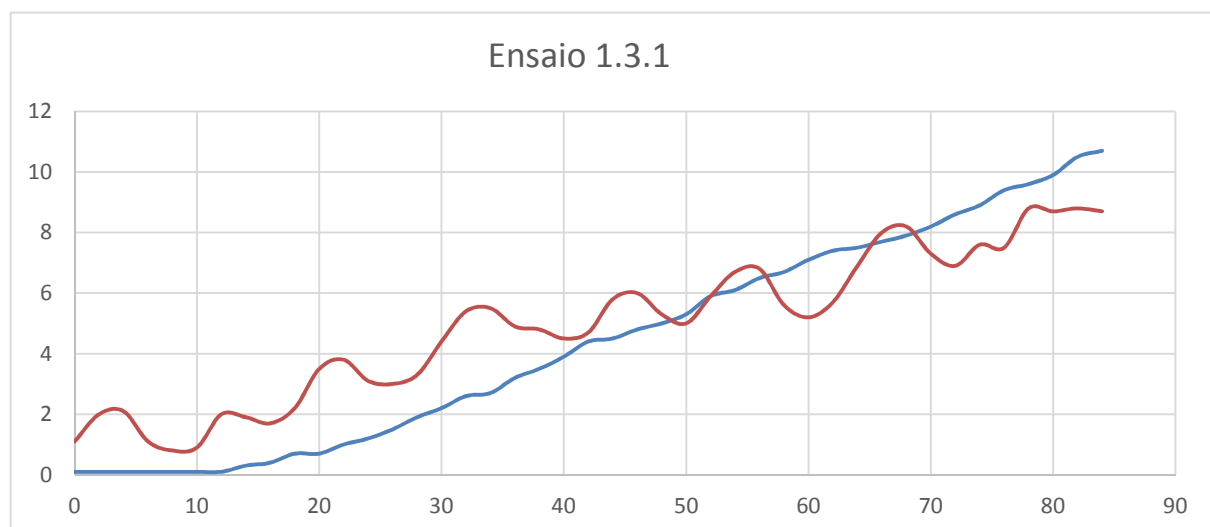


Figura 53 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.1 (dimensões em cm)

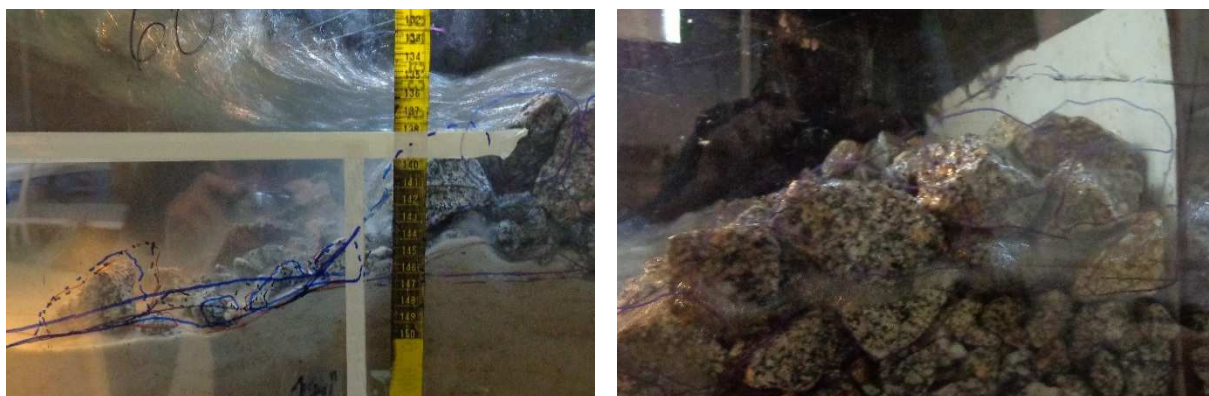


Figura 54 – Perfil dos fundos e deslocamento da risberma e assentamento do coroamento

Ensaio 1.3.3

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,075 m correspondente ao prolongamento de três fiadas de enrocamentos do manto secundário e com comprimento de 3 m.

Tabela 28 – Características do ensaio 1.3.3

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	3	3	1.3.3	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: verificaram-se assentamentos com cerca de 0,5 cm. Alguma movimentação de blocos observadas. Três blocos foram removidos no entanto o manto continuou estável;
- Risberma: verificou-se uma flexibilidade da adaptação da risberma às erosões verificadas formando um talude com uma inclinação suave. Deslizamento dos blocos em cerca de 7cm. Verificou-se acumulação de areia na risberma, Figura 56;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento do manto. Verificaram-se movimentações em alguns blocos quando sujeitos à ação das ondas. Foram removidos alguns blocos no entanto a estabilidade não foi comprometida;
- Pé de talude: pouca atividade verificada com erosões praticamente nulas;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 16,5 a 13,0 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 12,5 cm e uma altura de 2,4 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude, Figura 55;

- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

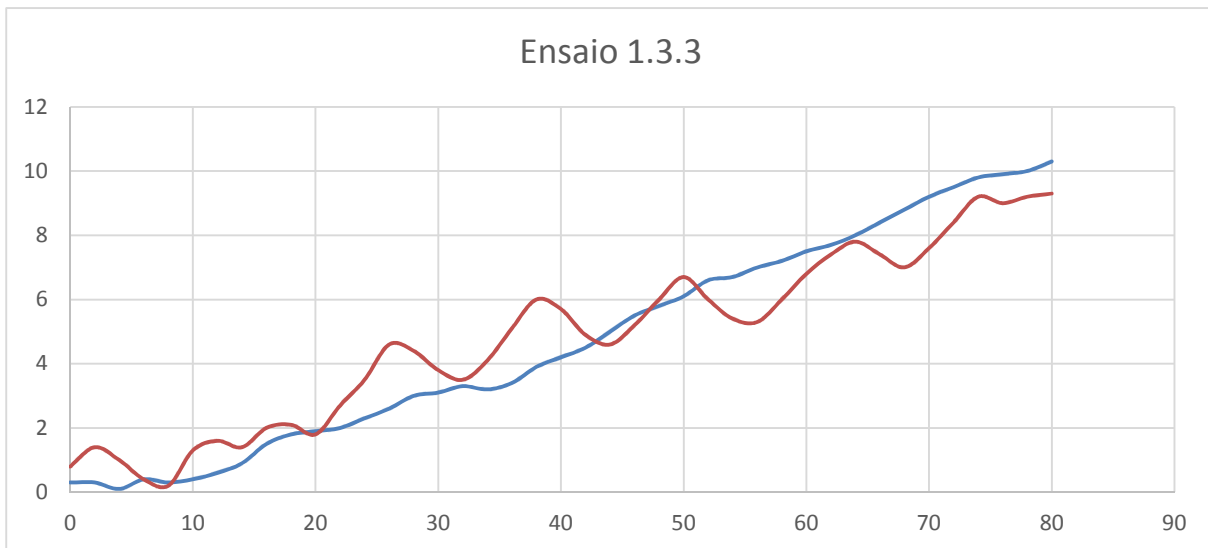


Figura 55 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.3 (dimensões em cm)



Figura 56 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 1.3.3

Ensaio 1.3.5

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,075 m correspondente ao prolongamento de três fiadas de enrocamentos do manto secundário e com comprimento de 5 metros.

Tabela 29 – Características do ensaio 1.3.5

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
1	3	5	1.3.5	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: verificaram-se assentamentos com cerca de 0,4 cm. Alguma movimentação de blocos observadas. Quatro blocos foram removidos no entanto o manto continuou estável;
- Risberma: verificou-se uma flexibilidade da adaptação da risberma às erosões verificadas formando um talude com uma inclinação suave. Deslizamento dos blocos de 10cm. Verificou-se acumulação de areia na risberma, Figura 58;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento do manto. Verificaram-se movimentações em alguns blocos quando sujeitos à ação das ondas;
- Pé de talude: pouca atividade verificada com erosões praticamente nulas;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 15,5 a 12,7 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 10 cm e uma altura de 2,5 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos blocos do pé de talude, Figura 57;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

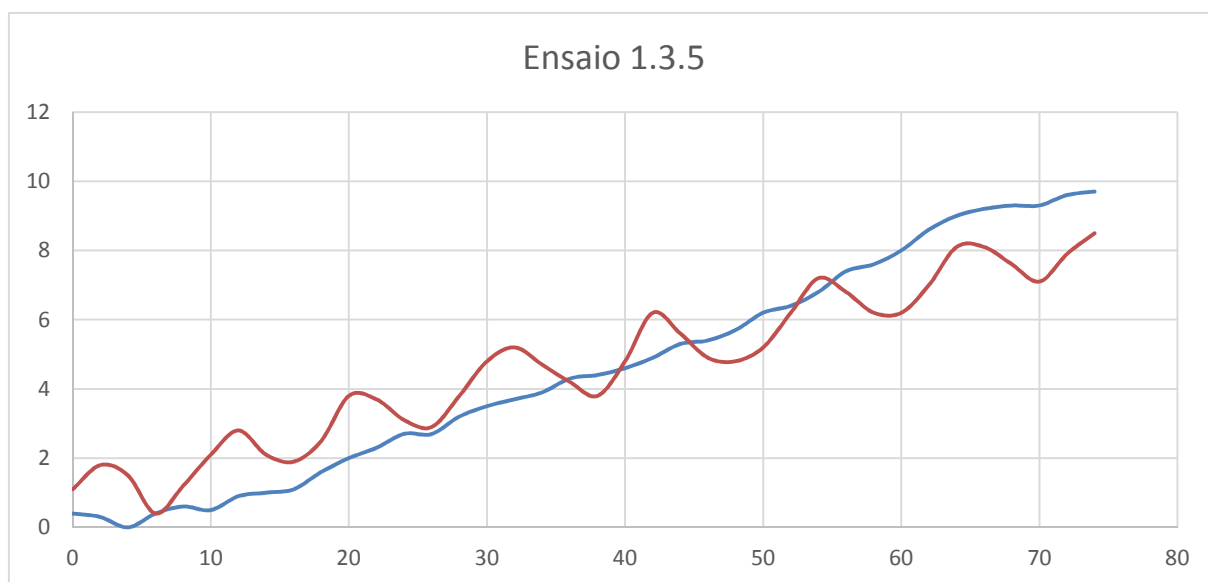


Figura 57 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 1.3.5 (dimensões em cm)



Figura 58 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma do ensaio 1.3.5

4.1.3.SÉRIE DE ENSAIOS 2

A série de ensaios 2 representa a série de ensaio sobre o modelo 2. O modelo 2 apresenta uma risberma como sendo o prolongamento do manto resistente, assim como mostra a Figura 59.

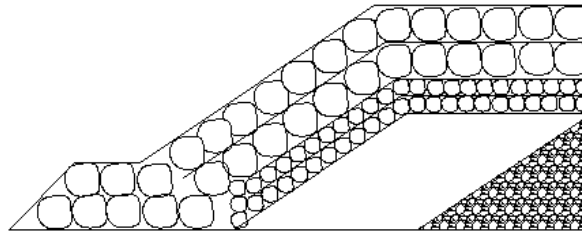


Figura 59 – Perfil tipo da série de ensaios 2

Da mesma forma que a série de ensaio 1, também nesta série a risberma assumirá dois níveis de altura, um primeiro nível com altura correspondente a uma fiada de enrocamentos e uma segundo nível correspondente a duas fiadas de enrocamento. Para além disso, para cada um destes níveis de altura foram ensaiados três comprimentos diferentes (1, 3 e 5 metros)

A Tabela 30 apresenta um resumo das principais características das risbermas e estado do mar a que o modelo 2 foi sujeito.

Tabela 30 – Principais características da série de ensaios 2

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	1	1	2.1.1	0,30	1,83	0,30	5:1
	1	3	2.1.3	0,30	1,83	0,30	5:1
	1	5	2.1.5	0,30	1,83	0,30	5:1
	2	1	2.2.1	0,30	1,83	0,30	5:1
	2	3	2.2.3	0,30	1,83	0,30	5:1
	2	5	2.2.5	0,30	1,83	0,30	5:1

Ensaio 2.1.1

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0.05 m correspondente ao prolongamento de uma fiada de enrocamentos do manto resistente e com comprimento de um metro.

Tabela 31 – Características do ensaio 2.1.1

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	1	1	2.1.1	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: devido às erosões verificadas no pé de talude o manto sofreu uma assentamento/deslizamento. Foram verificadas movimentações de blocos quando sujeitos à ação das ondas sendo que 12 blocos foram deslocados;
- Risberma: deslocou-se cerca de 2,1 cm devido às fossas de erosões. Inicialmente houve uma deposição de sedimentos com altura de 3,5 cm, Figura 61, no entanto no fim do ensaio verificou-se uma fossa de erosão com 1,7 cm de profundidade;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento do manto. Verificaram-se movimentações em alguns blocos quando sujeitos à ação das ondas. Verificaram-se galgamentos frequentes;
- Pé de talude: verificaram-se erosões com 2,4 cm de profundidade, Figura 61;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 11 a 15 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 13,7 cm e uma altura de 4,5 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude que preencheram a fossa;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

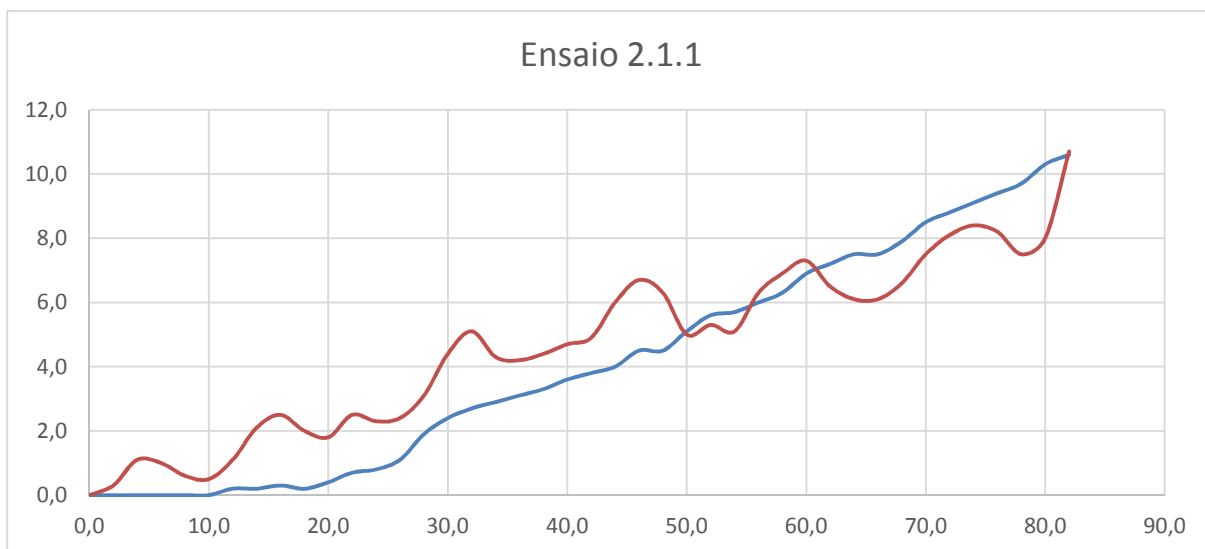


Figura 60 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.1 (dimensões em cm)

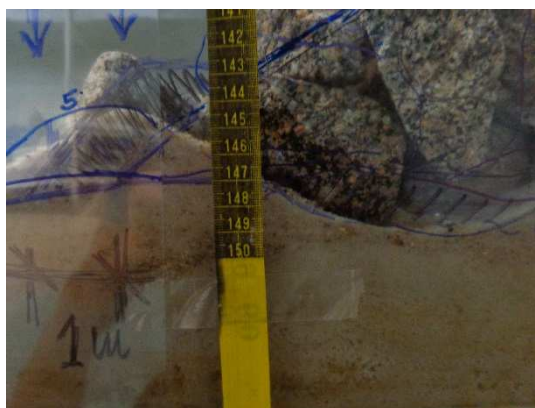


Figura 61 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.1

Ensaio 2.2.1

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,10 m correspondente ao prolongamento de duas fiadas de enrocamentos do manto resistente e com comprimento de 1 metro.

Tabela 32 – Características do ensaio 2.2.1

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	2	1	2.2.1	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: devido às erosões verificadas no pé de talude o manto sofreu um assentamento/deslizamento. Foram verificadas movimentações de blocos quando sujeitos à ação das ondas sendo que 12 blocos foram deslocados;
- Risberma: assentamento de 5 cm devido às erosões verificadas fazendo com que os blocos se movimentassem, Figura 63;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento do manto. Verificaram-se movimentações em alguns blocos quando sujeitos à ação das ondas;
- Pé de talude: verificou-se erosões com 1,0 cm de profundidade;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 15 a 13,5 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas 12 cm e uma altura de 3,5 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude que preencheram a fossa, Figura 62;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

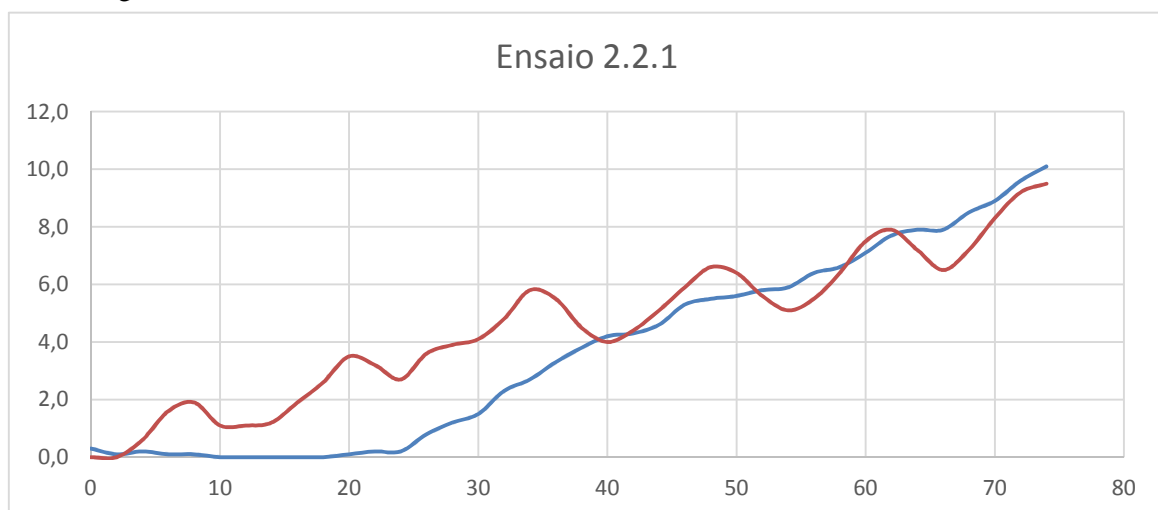


Figura 62 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.1 (dimensões em cm)

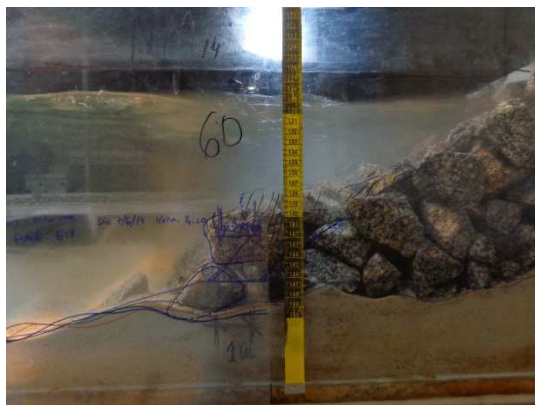


Figura 63 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.2.1

Ensaio 2.1.3

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,05 m correspondente ao prolongamento de uma fiada de enrocamento do manto resistente e com comprimento de 3 metros.

Tabela 33 – Características do ensaio 2.1.3

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	1	3	2.1.3	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: devido às erosões verificadas no pé de talude o manto sofreu um pequeno assentamento provocando instabilidade em algum dos blocos que se movimentavam quando sujeitos à ação das ondas. Alguns blocos foram removidos no entanto a estabilidade da estrutura nunca esteve em causa;
- Risberma: inicialmente verificou-se uma pequena deposição de sedimentos no entanto no fim do ensaio verificou-se um assentamento de 4 cm devido às erosões verificadas fazendo com que os blocos se movimentassem e deslizassem 4 cm;
- Coroamento: acompanhou o deslizamento e assentamento do manto. Verificaram-se movimentações em alguns blocos quando sujeitos à ação das ondas;
- Pé de talude: pequena erosão na fundação do manto com cerca de 0,9 cm de profundidade;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 14,5 a 11 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas de 11 cm e uma altura de 2,0 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude, Figura 64. Os blocos da risberma, no final do ensaio, formavam um pequeno talude de pouca inclinação;

- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

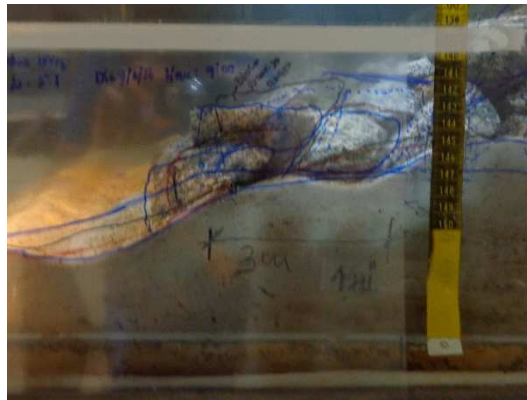


Figura 64 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.3

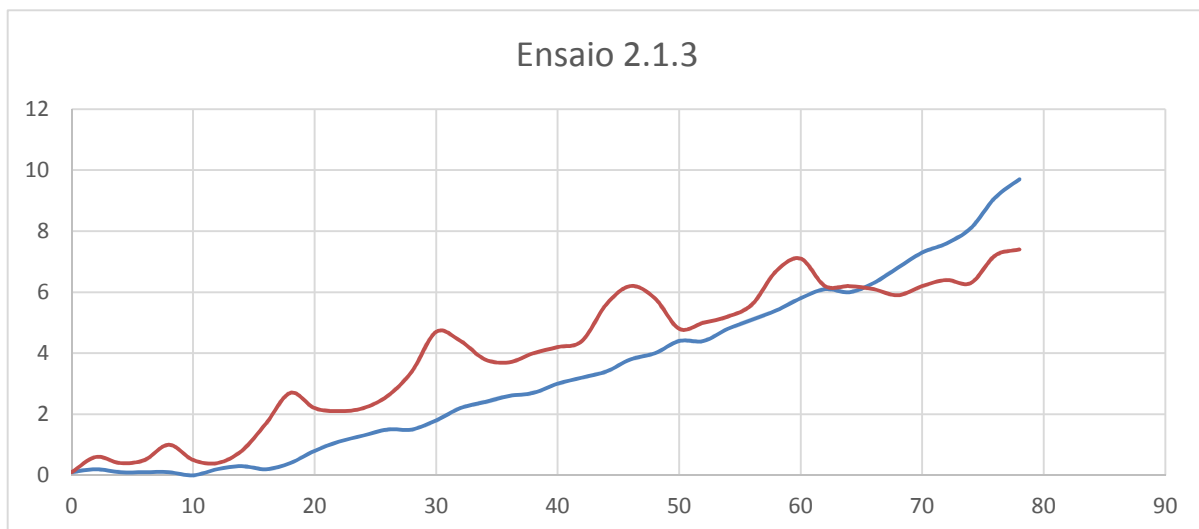


Figura 65 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.3 (dimensões em cm)

Ensaio 2.2.3

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,10 m correspondente ao prolongamento de duas fiadas de enrocamento do manto resistente e com comprimento de 3 metros.

Tabela 34 – Características do ensaio 2.2.3

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	2	3	2.2.3	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: os assentamentos foram nulos verificando-se um bom comportamento do manto;
- Risberma: verificaram-se grandes assentamentos com cerca de 4,3 cm provocando assim o deslizamento dos primeiros blocos da risberma. Os blocos da fiada superior colmataram os vazios provocados pelo deslizamento dos primeiros blocos da risberma. Alguns blocos foram removidos da risberma;
- Coroamento: verificou-se um bom comportamento sem movimentação de blocos significativo nem blocos removidos;
- Pé de talude: verificou-se pouca atividade e consequentemente não se verificaram erosões significativas;
- Envolve da crista das ondas: altura de 14,5 a 12,5 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas de 11 cm e uma altura de 2,0 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude, Figura 67. Os blocos da risberma, no final do ensaio, formavam um pequeno talude de pouca inclinação;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

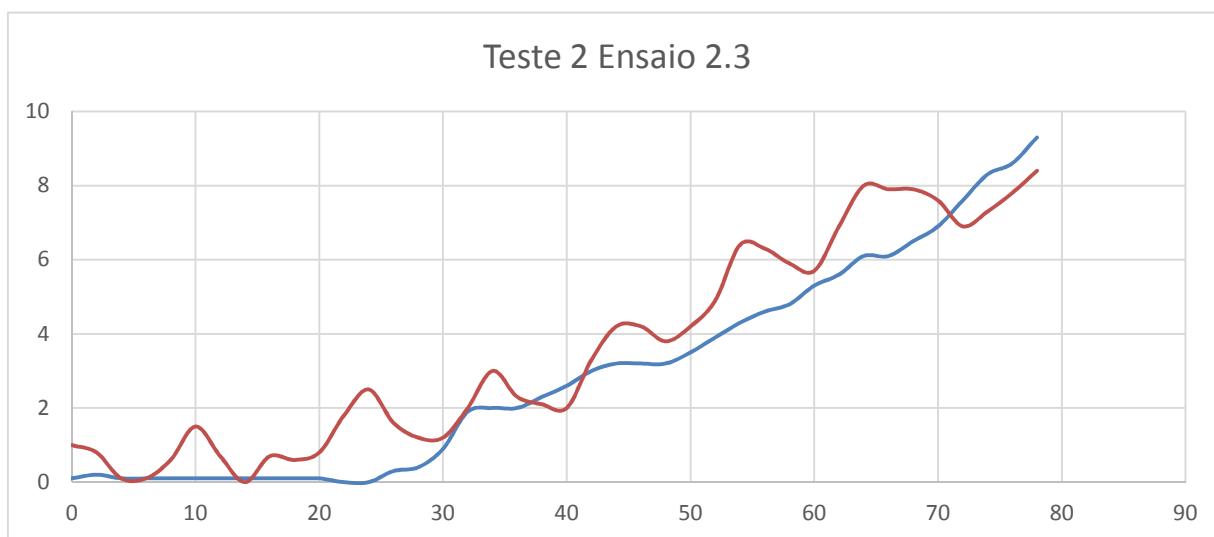


Figura 66 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.3 (dimensões em cm)

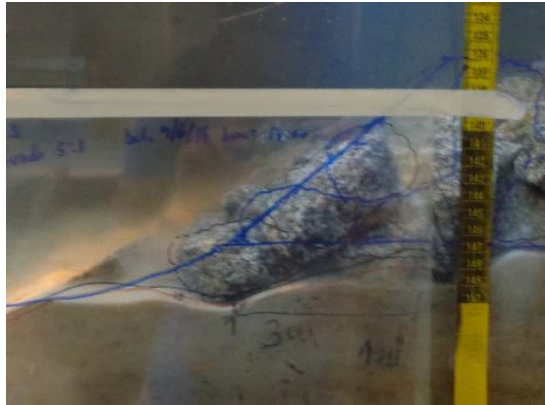


Figura 67 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.2.3

Ensaio 2.1.5

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,05 m correspondente ao prolongamento de uma fiada de enrocamento do manto resistente e com comprimento de 5 metros.

Tabela 35 – Características do ensaio 2.1.5

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	1	5	2.1.5	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: os assentamentos foram nulos verificando-se um bom comportamento do manto;
- Risberma: verificaram-se poucas erosões provocando um deslocamento de 1 cm;
- Coroamento: verificou-se um bom comportamento sem movimentação significativa de blocos. Nenhum bloco foi removido;
- Pé de talude: verificou-se pouca atividade e conseqüentemente não se verificaram erosões significativas;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 14,5 a 12,5 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas de 13,7 cm e uma altura de 3,5 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura que por sua vez provocou o rolamento dos primeiros blocos do pé de talude, Figura 69;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto, tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade.

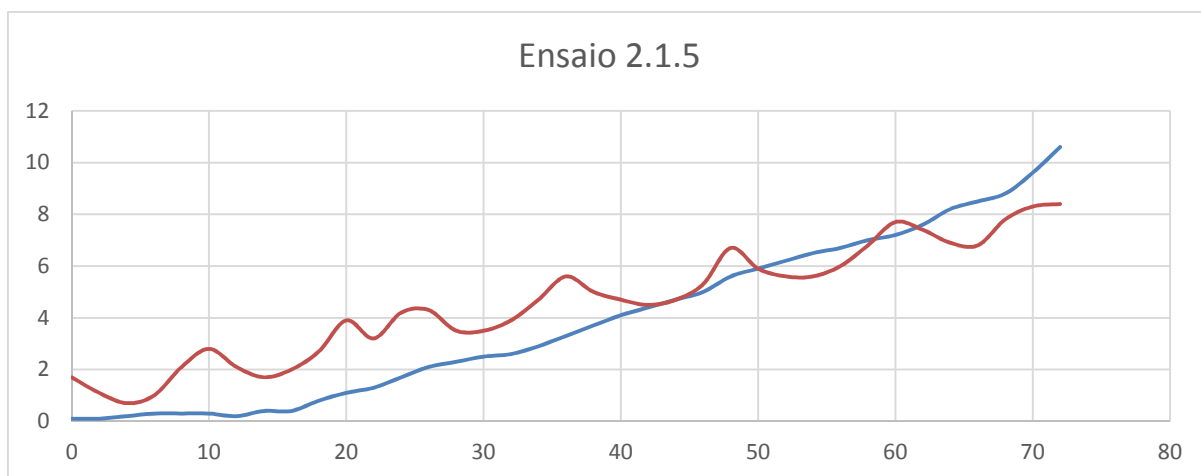


Figura 68 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.1.5 (dimensões em cm)

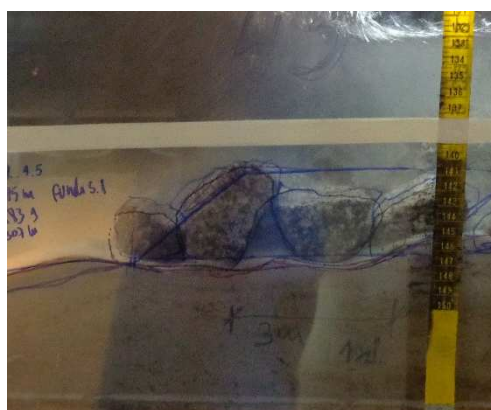


Figura 69 – Perfil do fundo e deslocamento da risberma no ensaio 2.1.5

Ensaio 2.2.5

Neste ensaio foi analisado o comportamento do manto resistente com uma risberma de proteção do pé de talude com uma altura de 0,05 m correspondente ao prolongamento de duas fiada de enrocamento do manto resistente e com comprimento de 5 metros.

Tabela 36 – Características do ensaio 2.2.5

Série de Ensaio	Risberma		Código do Ensaio	Altura de onda (m)	Período (s)	Altura de água (m)	Inclinação dos Fundos
	Nº de Fiadas	Comprimento (m)					
2	2	5	2.2.5	0,30	1,83	0,30	5:1

- Manto: os assentamentos foram nulos verificando-se um bom comportamento do manto;
- Risberma: verificaram-se erosões pouco significativas levando a um assentamento dos blocos de cerca de 1 cm;
- Coroamento: verificou-se um bom comportamento sem movimentação de blocos significativo nem blocos removidos;
- Pé de talude: verificou-se pouca atividade e conseqüentemente não se verificaram erosões significativas;
- Envolvente da crista das ondas: altura de 13,5 a 11,0 cm acima do nível médio da água;
- Perfil do fundo: formação de micro dunas espaçadas de 11,5 cm e uma altura de 2,7 cm; criação de uma fossa de erosão junto à estrutura;
- Rebentação: forte e direta sobre o manto; as ondas com maior altura por vezes rebentavam a meio caminho do canal, no entanto tinham energia suficiente para atingir a estrutura com alguma intensidade;

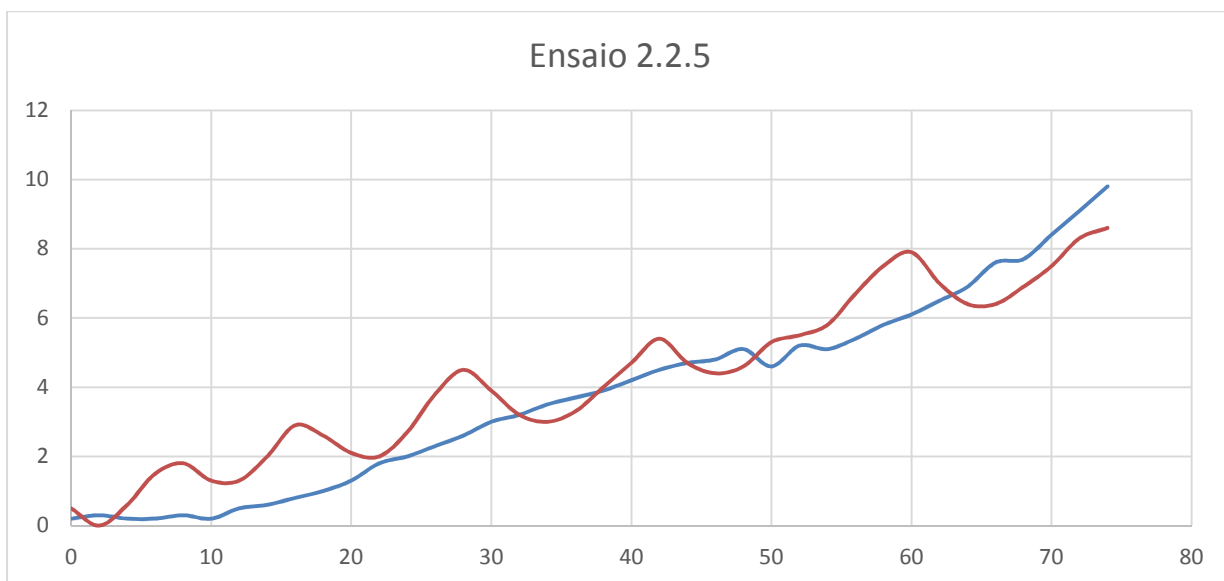


Figura 70 – Perfil inicial e final dos fundos do ensaio 2.2.5 (dimensões em cm)

4.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Os principais resultados que se retiraram e trataram neste teste laboratorial foram os perfis dos fundos e, correspondentemente, as profundidades máximas de erosão junto à estrutura e as velocidades orbitais próximas do fundo. Relativamente aos perfis, foram feitas duas recolhas de dados, uma série de perfis retirados através do vidro existente nas paredes do tanque e uma outra recolha de perfis através do ADV no centro do canal no início e no fim do ensaio. Através das sondas de nível hidrodinâmico e do *software* que lhes está associado recolheram-se dados relacionados com alturas de ondas, períodos e espectro de energia. Desta forma, recolheu-se uma diversa gama de resultados de forma a ser feita uma correta análise acerca do fenómeno erosivo junto a estruturas de talude e do efeito da risberma de proteção do pé de talude.

Os resultados acerca da profundidade máxima de erosão (S_m) podem estar condicionados com os problemas encontrados ao longo do ensaio descritos no ponto 4.3.

Na Tabela 37 estão apresentados todos os resultados supracitados relativos a todos os ensaios válidos para a análise do presente estudo relativos à sonda número cinco que se encontrava próxima da estrutura.

Tabela 37 – Análise da altura de onda, período e profundidade de erosão

	Nº de ondas	H _{max} (m)	H _{médio} (m)	H _{m0} (m)	T _{médio} (s)	T _{1/3} (s)	T _p (s)	S _m (centro) (cm)
Série de Ensaios 0								
Ensaio 0	2348	0,307	0,132	0,20	1,532	2,157	2,16	1,3
Série de Ensaios 1								
Ensaio 1.2.1	2270	0,311	0,136	0,20	1,583	2,173	2,16	2,0
Ensaio 1.2.3	2267	0,314	0,136	0,20	1,584	2,166	2,16	1,8
Ensaio 1.2.5	2265	0,306	0,135	0,20	1,585	2,166	2,16	0,9
Ensaio 1.3.1	2268	0,338	0,138	0,21	1,583	2,162	2,16	2,0
Ensaio 1.3.3	2300	0,308	0,135	0,20	1,565	2,167	2,16	1,8
Ensaio 1.3.5	2263	0,312	0,136	0,20	1,586	2,173	2,16	2,2
Série de Ensaios 2								
Ensaio 2.1.3	2276	0,314	0,139	0,21	1,577	2,169	2,16	2,3
Ensaio 2.1.5	2257	0,329	0,140	0,21	1,592	2,165	2,16	2,2
Ensaio 2.2.1	2281	0,318	0,138	0,21	1,575	2,163	2,16	1,4
Ensaio 2.2.3	2286	0,319	0,138	0,21	1,575	2,166	2,16	1,0
Ensaio 2.2.5	2278	0,318	0,136	0,20	1,578	2,155	2,16	1,2

Como supra referido, durante o ensaio foi recolhida, através do ADV, a velocidade junto ao fundo móvel. No entanto, devido à errada orientação do aparelho de monitorização foi feito um registo erróneo deste parâmetro, sendo que apenas no último ensaio foi detetado o mau posicionamento do aparelho. Contudo, foi considerado que o correto registo da velocidade do último ensaio pode ser aplicado a todos os outros, uma vez que as condições de ondas dos ensaios são semelhantes, não descartando pequenas diferenças dos resultados que seriam de esperar devido, por exemplo, a diferente disposição dos blocos que altera o coeficiente de reflexão e, consequentemente, a altura de onda. Apesar disto, esta hipótese será ignorada.

No Anexo G está representado um quadro resumo dos principais aspetos verificados nos ensaios.

4.3. VALIDADE DOS RESULTADOS E PROBLEMAS

Desde logo foi possível concluir que os resultados obtidos em laboratório estariam condicionados por vários fatores. Foi possível chegar a esta conclusão logo no primeiro ensaio realizado, em que foi testada a estrutura sem risberma. Seria de esperar que a estrutura sofresse uma rotura abrupta ou simplesmente

que se verificasse instabilidade no manto resistente. Contudo, isto não se verificou sendo que os seguintes fatores possam ter condicionado os resultados:

- **Conceção da estrutura:** a estrutura foi construída no canal suportada no tardo por uma massa de areia. Devido a essa massa de areia e aos galgamentos frequentes admite-se que o fluxo criado pela massa de água relativa aos galgamentos tenha transportado sedimentos através da estrutura, acumulando-se areia no pé de talude, criando assim uma situação estável, contrariamente ao que seria previsto. Efetivamente, nos primeiros ensaios verificou-se um assentamento significativo na massa de areia do tardo daí que os primeiros ensaios tenham sido influenciados por este fator. Contudo, de forma a contornar este problema, parte dessa areia foi retirada e substituída por enrocamento de pequenas dimensões e foi colocada uma placa de madeira para evitar a passagem de água por parte dos galgamentos. Com isto verificou-se que os assentamentos no tardo da estrutura atingiram o seu ponto de equilíbrio e esperando-se que o transporte de sedimento do tardo através da estrutura tenha sido anulado. No entanto não foi possível garantir tal facto.
- **Reperfilamento da estrutura:** o reperfilamento no fim de cada ensaio devia ser realizado com o tanque vazio e todo o enrocamento recolocado de raiz, ou seja, a estrutura deveria ser retirada e reorganizada de novo. Desta forma a fundação da estrutura era reperfilada evitando possíveis zonas de deposição ou erosão omitidas no fundo da estrutura que não poderiam ser observadas sem a remoção total da estrutura. Apenas no primeiro ensaio foram garantidas todos os dimensionamentos pré definidos. É de salientar que o reperfilamento de toda a estrutura não foi realizado devido ao curto prazo de utilização do tanque. Apenas foram disponibilizadas duas semanas para a realização dos ensaios o que se revelou um prazo bastante curto para a correta realização dos ensaios. Posto isto, definiu-se como prioridade a realização dos ensaios propostos em detrimento do exato reperfilamento da estrutura. O reperfilamento da estrutura foi realizado através da remoção dos blocos da risberma e primeiros blocos que a sobrepõem. Também o trabalho com água no tanque dificultou o reperfilamento da estrutura uma vez que a visualização não era a melhor e qualquer movimento brusco fazia-se notar no perfil do fundo. Decidiu-se trabalhar com água no tanque para otimizar o tempo de ensaio uma vez que o canal onde a estrutura está inserida é adaptada ao tanque de ondas e o esvaziamento e enchimento do tanque era demorado.
- **Dimensionamento da estrutura:** o dimensionamento do manto resistente e secundário teve como base a fórmula de Hudson. Nesta fórmula faz parte um fator K_D que representa o coeficiente de estabilidade e é função do tipo, forma e localização dos blocos, colocação, rugosidade, encaixe, permeabilidade de manto e número de camadas. Foi estabelecido para este coeficiente o valor de 1,7 baseado nos dados fornecidos pelo *Shore Protection Manual* para estruturas em taludes com enrocamento arredondado e liso, manto com duas camadas de espessura situada na zona da cabeça e dentro da zona de rebentação, como mostra a Tabela 38. Durante os ensaios laboratoriais este coeficiente mostrou-se bastante conservativo uma vez que a sua estabilidade não foi seriamente afetada em nenhum dos ensaios. Este valor revelou-se conservativo devido a dois fatores. O primeiro fator está relacionado com o dimensionamento em que, para definição do valor K_D , consideraram-se blocos de enrocamento lisos e arredondado. Isto influenciou os resultados obtidos pois não foi possível encontrar blocos com estas características. No ensaio foram utilizados enrocamento do tipo balastro, correntemente utilizado na construção de linhas férreas. O outro fator está relacionado com a colocação do enrocamento, em que esta ação foi realizada de forma cuidada garantindo assim uma maior estabilidade do manto resistente.

- Blocos deslocados: evidentemente que a remoção de blocos por parte da agitação marítima, influenciado ou não pelas erosões localizadas, é um resultado esperado, contudo muitas das vezes os blocos removidos acumulavam-se na zona do pé de talude aumentando assim a estabilidade da risberma de proteção do pé de talude. Isto é uma situação real e verificada em todo o tipo de estruturas marítimas de taludes em enrocamento, no entanto o presente estudo visa o estudo de risberma sendo esperado reproduzir casos extremos. Ora, esta remoção aleatória de blocos influencia diretamente os resultados esperados daí que vários ensaios deveriam ser realizados com as mesmas condições, quer geométricas quer de estado do mar, de forma a fazer uma análise mais cuidada representando os resultados sob a forma de um intervalo. Como já foi referido, pretendendo-se reproduzir casos extremos de instabilidade, assim o desejável passaria pela remoção de blocos do manto evitando a sua acumulação junto ao pé de talude.
- Rebentação da onda: inicialmente era esperado que a onda rebentasse antes do encontro com a estrutura, o que não se verificou nos ensaios. Durante os ensaios a grande maioria das ondas rebentava diretamente sobre o manto não provocando o efeito esperado sobre o pé de talude. Isto fez com que as profundidades de erosão expectáveis junto à estrutura fossem menores, e com isto não se reproduziu o caso extremo de instabilidade que seria de esperar no caso da estrutura sem risberma. Assim, a análise do fenómeno erosivo nos fundos deve ser feita sob uma situação de não rebentação, contrariamente ao inicialmente considerado.

Todos estes fatores podem ter condicionado os resultados obtidos. No entanto não é conclusivo qual a sua influência nos resultados.

Tabela 38 – Valores de K_D segundo o SPM (1984)

Tipo de Blocos	Nº de Camadas	Perfil		Cabeça		Talude
		Dentro da Zona de Rebentação	Fora da Zona de Rebentação	Dentro da Zona de Rebentação	Fora da Zona de Rebentação	Cotg α
Liso e Arredondado	2	2,1	2,4	1,7	1,9	1,5 - 3,0
Liso e Arredondado	>3	2,8	3,2	2,1	2,3	1,5 - 3,0
Superfície Áspera e Irregular	1	(*)	2,9	(*)	2,3	1,5 - 3,0

* - Não é recomendado o emprego de uma só camada nestas situações

4.4. RELAÇÕES QUALITATIVAS

4.4.1. ANÁLISE DO DIÂMETRO DO ENROCAMENTO

A principal característica entre estes dois níveis de diâmetro do enrocamento reside na sua flexibilidade de adaptação ao fundo. Assim, pela análise da evolução dos ensaios é possível observar que a risberma com blocos de menor diâmetro teve um melhor comportamento às alterações de perfil do fundo adaptando-se às erosões verificadas junto à estrutura formando um talude com inclinação uniforme. Para além disso, no decorrer dos ensaios é possível observar que a adaptação aos fundos ocorre de uma forma contínua, isto significa que o movimento dos blocos que constituem a risberma com menor diâmetro não é feito de uma forma abrupta ao contrário dos blocos de maior dimensão. Isto significa que a evolução temporal da risberma está diretamente relacionada com a dimensão dos blocos, ou seja, quanto maior a dimensão dos blocos mais descontínuos serão os seus movimentos e a adaptação aos fundos e mais abruptos serão os seus movimentos. Isto provocará um assentamento abrupto do manto resistente que poderá levar a uma situação de instabilidade. Um outro pormenor está relacionado com o volume de vazios que se cria entre os blocos, sendo que nos blocos de maior dimensão esse volume é, aparentemente, superior. Se o volume de vazios é maior, o fluxo existente será maior e, inevitavelmente o movimento dos sedimentos através destes vazios será mais favorável criando assim condições apropriadas para o transporte de sedimentos. No caso dos blocos de dimensão menor, como o volume de vazios é inferior e, conseqüentemente, o fluxo é menor, cria-se assim um maior obstáculo ao movimento dos sedimentos, gerando-se neste caso uma situação mais favorável para existir deposição de sedimentos ao invés de uma situação de erosão. Na Figura 71 é possível observar a deposição de sedimentos que se localiza na zona de transição entre o manto resistente e a risberma referente à situação do ensaio 1.2.5. Em comparação, na Figura 72 está representada a erosão na zona de transição entre o manto e a risberma referente à situação do ensaio 2.2.3. Um outro aspeto que deve ser tido em conta está relacionado com o método construtivo da estrutura marítima. A risberma situa-se no ponto mais distante e profundo da estrutura marítima, isto quer dizer que, no caso de se pretender fazer a construção da risberma via terrestre as guias terão que ter um grande alcance e com isso, a capacidade de suporte da grua diminui. Assim, os blocos de pequena dimensão permitem o recurso a guias de menor capacidade para a sua colocação. Para além disso o seu manuseamento está mais facilitado devido às suas dimensões e peso. No caso dos blocos do manto resistente constituírem a risberma poderá não ser possível a colocação destes blocos via terrestre devido à falta de capacidade das guias resistirem ao momento criado pelo peso elevado dos blocos conjugados com um grande alcance do lança, sendo necessário recorrer a meios de transporte via marítima levando a um incremento do custo da obra. Para além disso é necessário ter em conta o fornecimento de blocos de grandes dimensões uma vez que, geralmente, a sua disponibilidade é limitada e mesmo o seu transporte obriga a recorrer a equipamentos mais robustos.



Figura 71 – Deposição de sedimento na zona de transição manto/risberma no ensaio 1.2.5



Figura 72 – Exemplo da erosão verificada na zona de transição manto/risberma no ensaio 2.2.3

4.4.2. ANÁLISE DO NÚMERO DE FIADAS

Pela análise dos ensaios é possível concluir que a principal influência do número de fiadas está relacionada com o facto da risberma se adaptar à alteração do perfil dos fundos fazendo com que os blocos se movam, sendo que os primeiros blocos a movimentarem-se são os da fiada que está em contacto com o fundo. Com isto os blocos vão-se afastando, criando vazios que são colmatados pelas fiadas superiores formando uma superfície rugosa que protege o fundo. Ora, quanto maior é o número de fiadas menores são estes vazios. No entanto não foram realizados ensaios suficiente com maior números de fiadas para concluir até que ponto o número de fiadas deixava de ter influência na alteração do perfil dos fundos. O número de fiadas influencia também o fluxo que atravessa a risberma, isto faz com que um maior número de fiadas crie maior obstáculo a esse fluxo, protegendo o fundo de uma forma mais eficaz. Para além disso, quanto maior o número de fiadas mais suave será o talude criado devido à adaptação da risberma aos fundo. No caso em estudo, e uma vez que a risberma se encontra próxima da superfície da água, a formação deste talude fará com que o coeficiente de reflexão diminua. Como já foi referido o coeficiente de reflexão é uma dos principais parâmetros que influencia a profundidade de erosão. Assim a criação deste talude por parte da risberma revela-se favorável para a estabilidade da estrutura. Este último aspeto tem apenas um fundamento baseado na observação ao longo dos ensaios uma vez que não foi possível estudar este parâmetro de uma forma rigorosa.

4.4.3. ANÁLISE DO COMPRIMENTO

É possível verificar que quanto maior é o comprimento da risberma maior estabilidade se verifica na estrutura. Contudo o aumento do comprimento nem sempre se traduz num aumento da estabilidade da estrutura uma vez que a partir de certo comprimento não se verificam alterações significativas na estabilidade. Daí que no dimensionamento deste tipo de estruturas, deve-se definir um comprimento de risberma eficaz do ponto de vista hidrodinâmico e equilibrado a nível económico. Durante os ensaios verificou-se que os blocos que sofrem maior deslizamento e assentamentos são os que se encontram na extremidade da risberma, sendo que estes assentamentos e deslizamentos dos blocos diminuem à medida que os blocos se encontram mais próximos do manto. Através dos perfis retirados através do vidro colocado na parede do tanque observou-se que as erosões verificadas imediatamente a seguir à risberma são semelhantes no caso de risbermas com o mesmo número de fiadas e diâmetro, verificando-se assim que quanto maior é o comprimento da risberma mais distanciadas ficam as erosões localizadas do pé de talude

4.5. RELAÇÕES QUANTITATIVAS

Inicialmente a previsão de erosão do modelo estudado sob as condições de onda pré definidas era relativa a uma situação de rebentação de onda. Contudo, devido aos problemas de rebentação já descritas deve ser considerada que a erosão dos fundos não é afetada significativamente pela rebentação. Assim, a fórmula 13 é a que melhor se enquadra para a previsão da profundidade máxima de erosão do caso em estudo. Na Tabela 39 estão representados os valores das profundidades máximas próxima da estrutura observados nos perfis retirados no vidro do tanque.

Tabela 39 – Valores da profundidade máxima de erosão no perfil retirado no vidro do tanque
(dimensões em cm)

Série de Ensaios	Ensaio	Sm (modelo)	Sm (protótipo)	
0	13	2,0	60,0	
	1	1.2.1	3,3	99,0
		1.2.3	3	90,0
		1.2.5	3	90,0
		1.3.1	3	90,0
		1.3.3	1,5	45,0
		1.3.5	1,8	54,0
		2	2.1.1	2,5
	2.1.3		2,4	72,0
	2.1.5		1,5	45,0
2.2.1	3,9		117,0	
2.2.3	3,7		111,0	
	2.2.5	1	30,0	

Assim, o intervalo de valores da profundidade máxima de erosão próximo à estrutura obtidos nos ensaios laboratoriais é [0,30; 1,17] m.

Relativamente às velocidade junto ao leito, Tabela 40 são apresentadas as velocidades obtidas pelo ADV no último ensaio.

Tabela 40 – Valores da velocidade junto ao leito das 4 Beams do ADV (dimensões em m/s)

	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4
Velocidade (modelo)	0,63	0,60	0,20	0,20
	-0,56	-0,59	-0,15	-0,20
Velocidade (protótipo)	3,46	3,26	1,08	1,08
	-3,09	-3,23	-0,83	-1,07

Considerando a velocidade máxima registado pelo ADV de 3,46 m/s e um intervalo de diâmetro da estrutura de [17; 22] m, pela aplicação da fórmula 13 obtém-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Previsão da profundidade máxima de erosão pela aplicação da fórmula 13

U_m (m/s)	T (s)	B (m)	KC	Cu	Sm (m)
3,46	11,5	17	2,3	0,8	0,54
3,46	11,5	22	1,8	0,8	0,70
3,46	11,5	17	2,3	1,0	0,68
3,46	11,5	22	1,8	1,0	0,88
3,46	11,5	17	2,3	1,2	0,82
3,46	11,5	22	1,8	1,2	1,06

Através da Tabela 41 define-se o intervalo de profundidade máxima previsto de [0,54; 1,06] m. Comparando este intervalo com o intervalo de valores de Sm da Tabela 38 conclui-se que o intervalo obtido é mais amplo, verificando-se um maior desvio do valor mínimo. Relativamente ao valor máximo da profundidade de erosão os valores obtidos pelos ensaios e pela aplicação da fórmula 13 são semelhantes sendo que o valor obtido em laboratório é ligeiramente inferior.

5

CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Os fenómenos erosivos localizados ocorrem a estruturas marítimas, podendo constituir um dos principais processos de rotura destas estruturas. Ao longo do presente estudo procurou-se ilustrar os fenómenos que estão envolvidos na alteração do perfil dos fundos, a sua influência no comportamento da estrutura e medidas de prevenção para combater o processo erosivo. Contudo, foi notória a dificuldade encontrada para descrever estes fenómenos devido à complexidade associada e à interação entre estes mesmos fenómenos. Os principais fenómenos responsáveis pela alteração dos fundos e consequentemente pelo processo de formação do perfil erosão/deposição são:

- Turbulência
- Contração do escoamento
- Vórtices
- Reflexão
- Difração/refração
- Rebentação

O tratamento individual destes fenómenos é por si só bastante complexo, já que num meio marítimo existe uma conjugação e uma interação entre fenómenos e o seu tratamento de uma forma conjunta demonstra-se bastante complexo. Associando estes fenómenos a características como o diâmetro dos sedimentos que constituem o fundo, a inclinação do taludes, a porosidade e a permeabilidade do talude e diâmetro da cabeça da estrutura marítima, torna-se ainda mais complexa a definição do processo erosivo. Esta questão tem dificultado a definição das dimensões da risberma a adotar em projeto. Contudo, diversos trabalhos têm sido realizados, e resultando deste formulações que se têm mostrado adequadas fazendo com que a risberma apresente um bom comportamento.

As formulações apresentadas pelo CEM para a previsão da profundidade máxima de erosão e para o dimensionamento da risberma, baseada em trabalhos de vários autores como Fowler, Hughes, Sumer, Fredsøe, etc, representa uma referência no tratamento destes assuntos. No entanto, existem ainda aspetos que não são considerados em algumas destas formulações, como é o caso do coeficiente de reflexão e o ângulo do talude.

Com o programa laboratorial realizado na presente dissertação foi possível analisar a influência da risberma no comportamento do manto. Para idênticas condições, o manto apresenta um melhor comportamento quanto maior for a extensão e a altura da risberma. Isto deve-se, efetivamente, ao facto do aumento do comprimento da risberma diminuir a atividade erosiva do fundo no pé de talude.

O diâmetro do enrocamento da risberma é outro aspeto que deve ser tido em conta. Está relacionado com a flexibilidade da risberma em se adaptar às alterações dos fundos e possibilitar a formação de um talude. Verifica-se que risbermas com diâmetro menor permitem uma melhor flexibilidade na adaptação à alteração dos fundos e uma melhor definição do talude formado devido ao deslizamento dos blocos. A formação deste talude diminui o coeficiente de reflexão, não sendo perceptível a sua influência no trabalho laboratorial realizado. Para além disso, o número de fiadas que constituem a risberma também caracteriza a formação do talude formado, uma vez que, quanto maior é o número de fiadas mais consistente é esse talude, ou seja, existe uma melhor colmatação dos vazios formados entre os blocos devido ao seu deslizamento. Com isto verifica-se uma proteção mais eficaz do pé de talude contra as erosões.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Com a realização desta dissertação e, nomeadamente do programa laboratorial realizado foi possível verificar o comportamento da estrutura para diferentes risbermas de proteção do pé de talude. Verificando-se diferenças significativas no comportamento do manto às diferentes características das risbermas. Assim recomenda-se que:

- Relativamente ao diâmetro do enrocamento que constitui a risberma verificou-se um melhor comportamento do manto com blocos de menor diâmetro devido à contínua adaptação da risberma às alterações dos fundos, não se verificando um deslizamento brusco que poderia criar instabilidade no manto. Para além disso, como o volume de vazios é menor, verificou-se uma proteção mais eficaz do fundo contra as erosões, observando-se em certas situações acumulação de sedimentos próximo do pé de talude.
- Quanto ao comprimento da risberma, é recomendado pelo CEM um comprimento mínimo de 3 m. Durante o trabalho laboratorial foram testados 3 comprimentos diferentes de risberma (1; 3 e 5m) baseado nas recomendações do CEM. Efetivamente verifica-se um comportamento aceitável do manto em risbermas com 3m de comprimento, sem que uma grande quantidade de blocos tenha sido removida do manto e, conseqüentemente, a estabilidade da estrutura tenha sido posta em causa e os assentamentos observados foram aceitáveis. Contudo, a risberma de maior comprimento foi a que melhores comportamentos registou, assim como seria expectável. Com isto recomenda-se que o comprimento da risberma nunca seja inferior a 3 metros sendo aconselhável um comprimento próximo dos 5 metros.
- Por fim é analisado o número de fiadas da risberma. Este aspeto deve estar diretamente relacionado com o diâmetro do enrocamento dos blocos da risberma sendo que o número de fiadas deve ser inversamente proporcional ao diâmetro dos blocos do enrocamento. Quer-se com isto dizer que um maior diâmetro do enrocamento implica um menor número de fiadas. Tendo em conta o trabalho laboratorial realizado recomenda-se que caso a risberma seja o prolongamento do manto resistente esta deve ter duas fiadas de altura. No entanto verificou-se um comportamento aceitável da risberma quando esta era constituída por apenas uma fiada. Relativamente à risberma como o prolongamento do manto secundário, esta deve ter três fiadas de altura, sendo esta última solução a que melhores resultados demonstrou.

Em suma, face aos resultados alcançados é aconselhável o projeto de risbermas como sendo o prolongamento do manto secundário, definindo uma altura de três fiadas de enrocamento e um comprimento de 5 metros.

O programa laboratorial a 2D foi limitado a duas semanas de ensaios devido à sobrecarga de utilização do tanque de ondas da FEUP.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Uma das principais lacunas detetadas nas formulações apresentadas na presente dissertação está relacionada com a ausência de alguns parâmetros nestas mesmas formulações.

Foi de fácil percepção que existe um grande número de variáveis associadas ao processo erosivo. Estas variáveis estão relacionadas quer com o estado da agitação marítima, características do fundo, características da estrutura marítima, características locais ao nível da topo-hidrografia e profundidade de água, daí o grande número de variáveis que envolvem este estudo. Assim, os desenvolvimentos futuros passam por realizar ensaios laboratoriais e apoiados na recolha de dados relativos às variáveis envolvidas de forma a fazer uma análise conjunta de todas as variáveis para a previsão da profundidade máxima de erosão e para a definição da risberma. Contudo é de salientar a complexidade do tratamento de todas estas variáveis.

Para além disso, não existe uma ligação entre as formulações apresentadas para a previsão da profundidade máxima de erosão e o dimensionamento da risberma. É de referir que o CEM, documento de referência na engenharia costeira, recomenda um comprimento de risberma entre 3 e 5 metros e uma altura de 2 a 3 vezes o diâmetro do enrocamento. Esta definição não tem em conta qualquer característica da agitação marítima ou da estrutura marítima, baseando-se na experiência.

Assim torna-se imprescindível encontrar uma formulação que defina as características da risberma tendo em conta as características da agitação marítima, estrutura e fundo.

BIBLIOGRAFIA

Bezerra, P. *Estudo de Soluções Mitigadoras de Erosões Localizadas em Estruturas de Defesa Costeira*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.

Coastal Engineering Manual (2008).

Fredsøe, J., Sumer, B.M., (1997). Scour at the round head of a rubble-mound breakwater. *Coastal Eng.* 29, 231–262.

Lillicrop, W.J., Hughes, S.A., 1993. *Scour hole problems experienced by the corps of engineers: data presentation and summary. Miscellaneous papers. CERC-93-2*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

Van der Meer, J.W., (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters. World Scientific. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering, Volume 1*. Ed. P.L.F. Liu, pp. 221-315.

Santos, P. R. *Análise da interação de navios com dispositivos de acostagem e amarração : estudo em modelo físico do posto "A" do terminal de petroleiros do Porto de Leixões*. Tese de Doutoramento, FEUP, 2010.

Sumer, B., Fredsøe, J. (2000). Experimental Study of 2D Scour and its Protection at a Rubble-Mound Breakwater. *Coastal Eng.* 40, 59 – 87.

Sumer, B., Fredsøe, J., Lamberti, A., Zanuttigh, B., Dixen, M., Gislason, K., Di Penta, A. (2005). Local Scour at Roundhead and Along the Trunk of Low Crested Structures. *Coastal Eng.* 52

Sumer, B., Fredsøe, J., (1997). Scour at the head of a vertical-wall breakwater. *Coastal Eng.* 29, 201–230.

Sutherland, J., Brampton, A., Motyka, G., Blanco, B., Whitehouse, R., (2003). Beach lowering in front of coastal structures – Appendices 1-3 – R&D Project FD 1916/PR.

Veloso Gomes, F. (1989). *Espraiamento em Taludes de Obras Marítimas*. Dissertação para Doutoramento, FEUP.

Veloso Gomes, F. (2013). *Algumas Reflexões sobre a Problemática das Obras de Proteção Costeira*. Apontamentos da Disciplina de Trabalhos Marítimos I, FEUP.

Xie, S.L., 1981. Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influence on the stability of the foundations of the breakwaters. Report. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, September, 61 pp.

ANEXOS

ANEXO A

SIMULAÇÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DA FOSSA DE EROSÃO, S_M ,
SEGUNDO O CEM (CONSIDERADA A NÃO REBENTAÇÃO DAS ONDAS)

Cu	1
----	---

U_m 5 m/s
B 15 m

T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
B (m)	Sm (sem rebentação) (m)						
10	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
11	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
12	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
13	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
14	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
15	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
16	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64

Cu	0,8
----	-----

U_m 5 m/s
B 15 m

T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
B (m)	Sm (sem rebentação) (m)						
10	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
11	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
12	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
13	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
14	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
15	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
16	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51

Cu	1,2
----	-----

U_m 5 m/s
 B 15 m

T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
B (m)	S _m (sem rebentação) (m)						
10	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
11	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
12	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
13	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
14	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
15	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
16	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77

ANEXO B

SIMULAÇÃO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DA FOSSA DE EROSÃO, S_M ,
SEGUNDO O CEM (CONSIDERADA A REBENTAÇÃO DAS ONDAS)

PM	4 m
Cu	1

				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	S _m (com rebentação)							
1	3	2,34	2,34	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	
0	4	3,12	3,12	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,1	
-1	5	3,9	3,9	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	
-2	6	4,68	4,68	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	
-3	7	5,46	5,46	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	
-4	8	6,24	6,24	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	
-5	9	7,02	7,02	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	

PM	4 m
Cu	0,66

				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	S _m (com rebentação) (m)							
1	3	2,34	2,34	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	
0	4	3,12	3,12	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	
-1	5	3,9	3,9	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	
-2	6	4,68	4,68	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	
-3	7	5,46	5,46	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	
-4	8	6,24	6,24	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	
-5	9	7,02	7,02	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	

PM	4 m
Cu	1,34

				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	Sm (com rebentação) (m)							
1	3	2,34	2,34	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	
0	4	3,12	3,12	1,0	1,3	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	
-1	5	3,9	3,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	
-2	6	4,68	4,68	1,1	1,4	1,7	2,0	2,4	2,7	3,1	
-3	7	5,46	5,46	1,1	1,4	1,8	2,1	2,5	2,9	3,3	
-4	8	6,24	6,24	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	
-5	9	7,02	7,02	1,2	1,5	1,9	2,2	2,6	3,0	3,5	

PM	2 m
Cu	1

				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	Sm (com rebentação) (m)							
1	1	0,78	0,78	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	
0	2	1,56	1,56	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	
-1	3	2,34	2,34	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	
-2	4	3,12	3,12	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,1	
-3	5	3,9	3,9	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	
-4	6	4,68	4,68	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	
-5	7	5,46	5,46	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	

PM	2 m
Cu	0,66

				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	Sm (com rebentação) (m)							
1	1	0,78	0,78	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	
0	2	1,56	1,56	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	
-1	3	2,34	2,34	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	
-2	4	3,12	3,12	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	
-3	5	3,9	3,9	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	
-4	6	4,68	4,68	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	
-5	7	5,46	5,46	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	

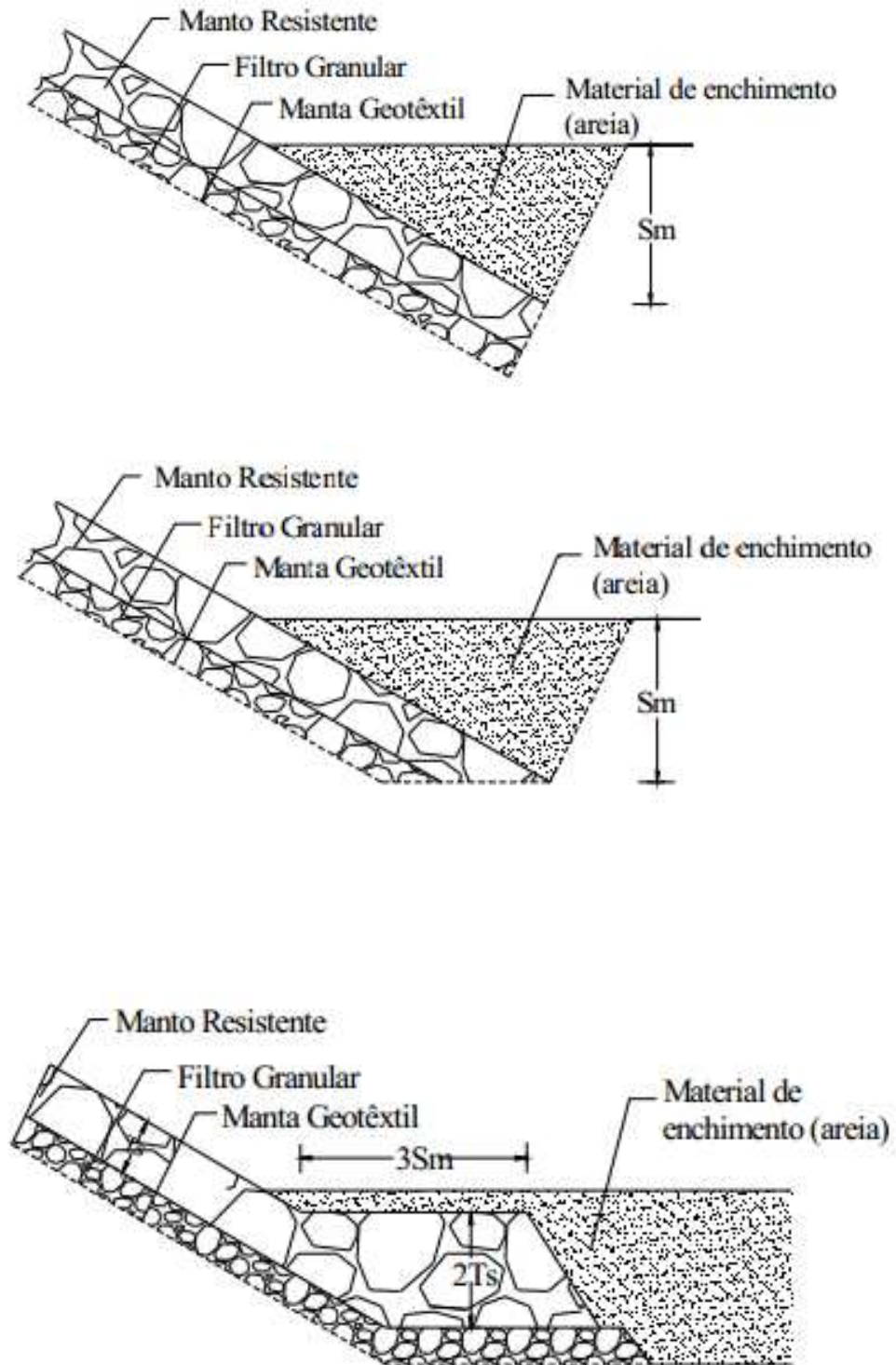
PM	2 m
Cu	1,34

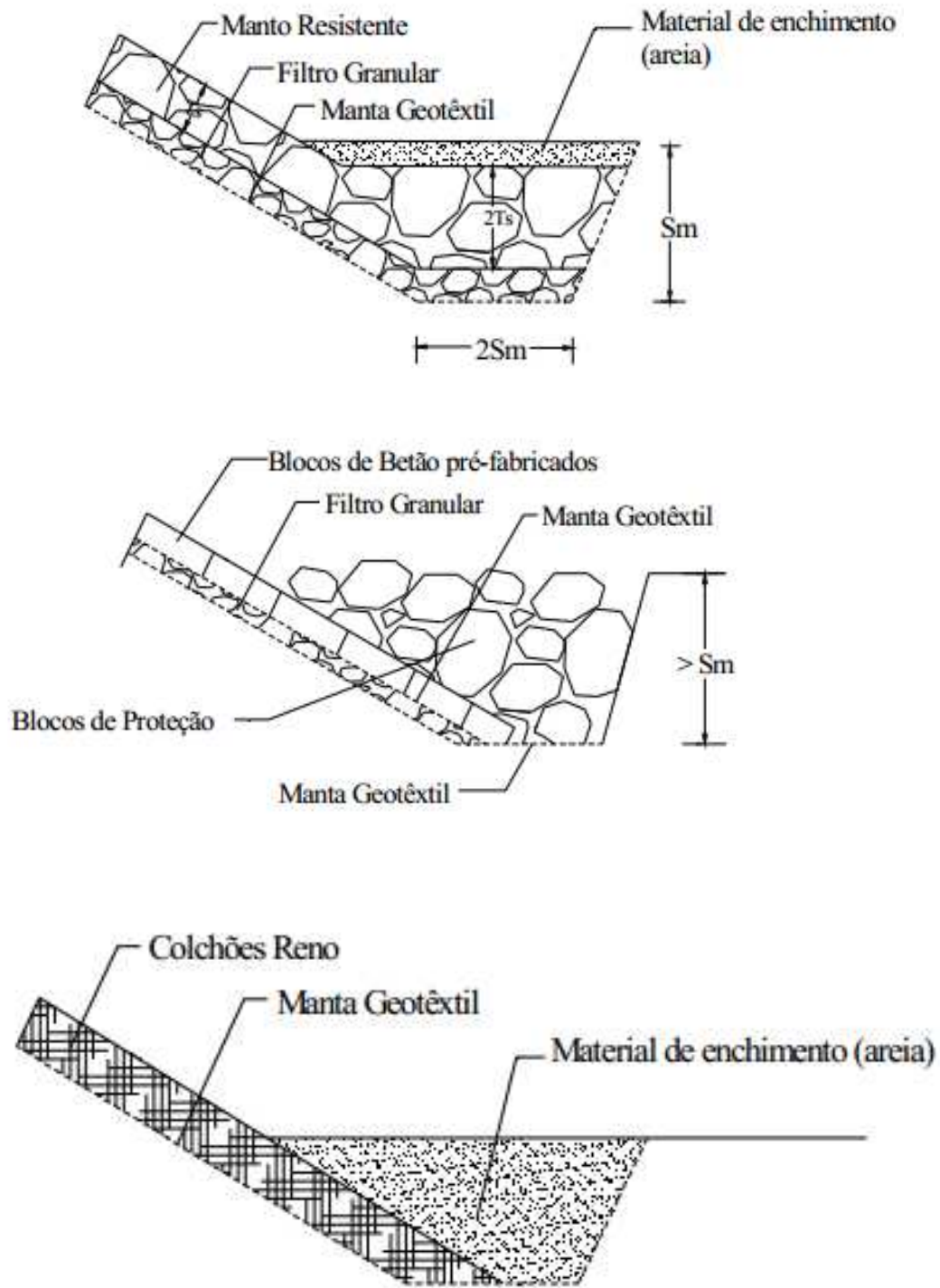
				T (s)=	6	7	8	9	10	11	12
Z (m)	Z +PM=hs	H _{max} =0.78d	H _d	Sm (com rebentação) (m)							
1	1	0,78	0,78	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	
0	2	1,56	1,56	0,8	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	
-1	3	2,34	2,34	0,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	
-2	4	3,12	3,12	1,0	1,3	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	
-3	5	3,9	3,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	
-4	6	4,68	4,68	1,1	1,4	1,7	2,0	2,4	2,7	3,1	
-5	7	5,46	5,46	1,1	1,4	1,8	2,1	2,5	2,9	3,3	

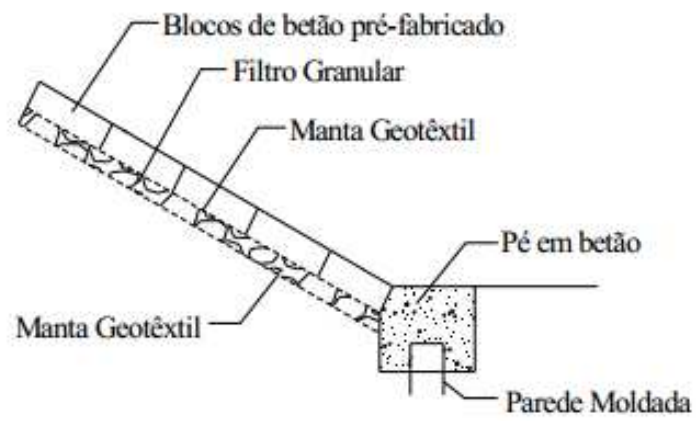
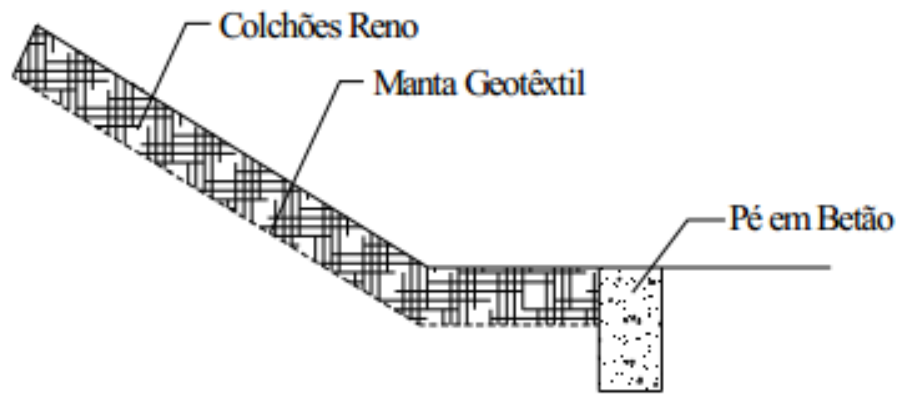
ANEXO C

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE RISBERMAS

APRESENTADAS PELO CEM







ANEXO D

DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA MARÍTIMA (PROTÓTIPO)

Manto Resistente (2 Camadas)

$$W = \frac{\gamma H^3}{K_D \left(\frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \cot g \theta}$$

H_s	3,12 m		
γ_r	26 kN/m ³		
γ_w	10,25 kN/m ³		
θ (3:2)	33,69		
K_D	1,7		
K_Δ	1,15		

$w_1=$	85,35 kN
$w_1=$	8,54 tf
$e_{\Delta 1}=$	1,71 m

Manto Secundário (2 Camadas)

$$W_2 = 10\% \text{ de } W_1$$

$w_1=$	85,35 kN		
$w_1=$	8,54 tf		
$e_{\Delta 1}=$	1,71 m		
K_D	1,7		
K_Δ	1,15		

$w_2=$	8,54 kN
$w_2=$	0,85 tf
$e_{\Delta 2}=$	0,79 m

Risberma

N_s	2,94	N_s^3	25,50	altura da risberma	1,88 m
hb/hs	0,68	hs	5,88		
$e_{\Delta 2}$	0,79 m		3 camadas	2,38 m	
			2 camadas	1,59 m	

ANEXO E

DIMENSIONAMENTO DO MODELO TESTADO EM LABORATÓRIO

Escala		1: 30							
Manto Resistente (2 Camadas)									
$W = \frac{\gamma H^3}{K_D \left(\frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \cot \theta}$									
H_{smodelo}	0,104 m	$w_1 =$	2,552 N						
γ_r	26 kN/m ³	$W_1+25\%$	3,189 N						
γ_w	9,81 kN/m ³	$W_1-25\%$	1,914 N						
θ (3:2)	33,69 °	$e_{\Delta 1}$	0,053 m						
K_D	1,7	$e_{\Delta 1} + 25\%$	0,057 m						
K_{Δ}	1,15	$e_{\Delta 1} - 25\%$	0,048 m						
w_1	[3,19;1,91] N	w_1	325,117 195,070 gramas						
$e_{\Delta 1}$	[0,057;0,048] m								
Manto Secundário(2 Camadas)									
$W_2 = 10\% \text{ de } W_1$									
$w_1 =$	2,552 N	$w_2 =$	0,255 N						
		$W_2+25\%$	0,332 N						
$e_{\Delta 1}$	0,053 m	$W_2-25\%$	0,179 N						
K_D	1,7	$e_{\Delta 2}$	0,025 m						
K_{Δ}	1,15	$e_{\Delta 2} + 25\%$	0,027 m						
		$e_{\Delta 2} - 25\%$	0,022 m						
W_2	[0,33;0,18] N	W_2	33,812 18,207 gramas						
$e_{\Delta 2}$	[0,027;0,022] m								
Risberma									
N_s	0,294	N_s^3	0,026						
h_b/h_s	0,680	h_s	0,196 m						
Altura teorica da risberma			0,063 m						
$e_{\Delta 2}$	0,025 3 camadas		0,074 m						
	2 camadas		0,049 m						
Altura de água no tanque			0,307 m						
Semelhança de Froude									
Geometrica	γ^1	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Protótipo</th> <th>Modelo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Periodo (s)</td> <td>10</td> <td>1,83</td> </tr> </tbody> </table>			Protótipo	Modelo	Periodo (s)	10	1,83
	Protótipo			Modelo					
Periodo (s)	10	1,83							
Periodo	$\gamma^{\frac{1}{2}}$								

ANEXO F

ALTURA DE ONDA E PERÍODO REGISTRADO PELA
SONDA DE NÍVEL E CÁLCULO DO COEFICIENTE DE
REFLEXÃO ATRAVÉS DO NÚMERO DE IRIBARREN

	Nº de ondas	H _{max} (m)	H _{médio} (m)	H _{m0} (m)	T _{médio} (s)	T _{1/3} (s)	T _p (s)	S _m (cm)	h (m)	L _p (m)	β	I _r	C _r
Série de Ensaios 0													
Ensaio 0	2348	0,307	0,132	0,20	1,532	2,157	2,16	1,3	6	218,53	33,69	3,51	0,30
Série de Ensaios 1													
Ensaio 1.2.1	2270	0,311	0,136	0,20	1,583	2,173	2,16	2,0	6	218,53	33,69	3,58	0,30
Ensaio 1.2.3	2267	0,314	0,136	0,20	1,584	2,166	2,16	1,8	6	218,53	33,69	3,58	0,30
Ensaio 1.2.5	2265	0,306	0,135	0,20	1,585	2,166	2,16	0,9	6	218,53	33,69	3,59	0,30
Ensaio 1.3.1	2268	0,338	0,138	0,21	1,583	2,162	2,16	2,0	6	218,53	33,69	3,55	0,30
Ensaio 1.3.3	2300	0,308	0,135	0,20	1,565	2,167	2,16	1,8	6	218,53	33,69	3,55	0,30
Ensaio 1.3.5	2263	0,312	0,136	0,20	1,586	2,173	2,16	2,2	6	218,53	33,69	3,58	0,30
Série de Ensaios 2													
Ensaio 2.1.3	2276	0,314	0,139	0,21	1,577	2,169	2,16	2,3	6	218,53	33,69	3,52	0,30
Ensaio 2.1.5	2257	0,329	0,14	0,21	1,592	2,165	2,16	2,2	6	218,53	33,69	3,54	0,30
Ensaio 2.2.1	2281	0,318	0,138	0,21	1,575	2,163	2,16	1,4	6	218,53	33,69	3,53	0,30
Ensaio 2.2.3	2286	0,319	0,138	0,21	1,575	2,166	2,16	1,0	6	218,53	33,69	3,53	0,30
Ensaio 2.2.5	2278	0,318	0,136	0,20	1,578	2,155	2,16	1,2	6	218,53	33,69	3,56	0,30

ANEXO G

RESUMO DOS RESULTADOS OBSERVADOS
NOS ENSAIOS DESENVOLVIDOS

Série de Ensaios	Ensaio	Talude Formado pela Risberma	Consistência do Talude da Risberma	Risberma	Comportamento do manto	Coroamento	Erosão/Deposição na transição Manto/Risberma
0	0	-	-	-	deslizamento do manto em 3 cm e assentamento de 2 cm; 2 blocos foram removidos; grande movimentação de blocos	assentamento de 0,5 cm; pouca movimentação de blocos registada	nada a assinalar
1	1.2.1	formação de talude com inclinação 3:2	pouco consistente	assentamentos e deslizamentos considerável provocando assentamentos no manto	deslizamento do manto em 1 cm; 11 blocos removidos e grande movimentação de blocos verificada; manto pouco estável	assentamento de 0,5 cm; alguns blocos removidos	verificaram-se deposições - 1,5 cm
	1.2.3	formação de talude suave	consistente	boa adaptação às alterações dos fundos	bom comportamento sem se verificarem assentamentos significativos; 2 blocos foram removidos; verificada a estabilidade da estrutura	pequeno assentamento de 0,3 cm; nenhum bloco removido	nada a assinalar
	1.2.5	formação de talude suave	consistente	boa adaptação às alterações dos fundos	não se verificaram assentamentos; 2 blocos foram removidos	nada a assinalar	nada a assinalar
	1.3.1	formação de talude com inclinação 3:2	pouco consistente	deslizamento verificado provocando assentamentos no manto	verificado deslizamento do manto - 1,2 cm; 8 blocos foram removidos; verificada alguma instabilidade	assentamento de 2 cm com alguns blocos removidos	verificaram-se deposições - 1,5 cm
	1.3.3	formação de talude suave	consistente	bom comportamento; deslizamento verificado formando assim um talude	verificou-se um pequeno assentamento de 0,5 cm; 3 blocos foram removidos sem se verificar instabilidade	verificaram-se assentamento provocando a remoção de alguns dos blocos	verificaram-se deposições - 3,5 cm
	1.3.5	formação de talude suave	muito consistente	bom comportamento; deslizamento verificado formando assim um talude	pequeno assentamento verificado - 0,4 cm; 4 blocos foram removidos no entanto não se verificou instabilidade	pequeno assentamento de 1 cm	verificaram-se deposições - 3,5 cm
2	2.1.1	sem Definição	-	assentamentos e deslizamentos significativos	12 blocos removidos; verificada alguma instabilidade	Alguns Blocos removidos; verificaram-se assentamentos	verificaram-se erosões - 2,3 cm

2.1.3	formação de talude suave	pouco consistente	boa adaptação aos fundos como alguns vazios entre os blocos	estável com alguns blocos removido; verificaram-se pequenos assentamentos	verificou-se um pequeno assentamento - 0,5 cm	pequena deposição - 1 cm
2.1.5	nada a assinalar	pouco consistente	bom comportamento da risberma à pequena alterações dos fundos	pequeno assentamento registado - 0,5 cm; remoção de 5 blocos no entanto sem comprometimento da estabilidade	nada a assinalar	nada a assinalar
2.2.1	sem Definição	-	assentamentos e deslizamentos significativos	alguns blocos removidos que se acumularam na risberma; verificada alguma instabilidade	Alguns Blocos removidos; verificaram-se assentamentos	verificaram-se erosões - 3 cm
2.2.3	formação de talude suave	consistente	bom comportamento da risberma adaptando-se às alterações dos fundos	bom comportamento do manto sem se registarem blocos removidos	nada a assinalar	nada a assinalar
2.2.5	nada a assinalar	muito consistente	bom comportamento da risberma adaptando-se às alterações dos fundos	bom comportamento sem se registarem assentamento nem blocos removidos	nada a assinalar	nada a assinalar