



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Utilização de ferramentas informáticas para apoio à avaliação do dano em modelo físico reduzido**

**MIGUEL ÂNGELO SILVA BASTOS**

Licenciado em Engenharia Civil

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Civil no ramo de Hidráulica

Orientadores:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Mestre Rute Maria Gomes de Lemos

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais:

Doutor Rui Jorge Pereira Capitão

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

**Julho 2017**

## RESUMO

O trabalho realizado surge devido à necessidade de simular eventos como tempestades, nomeadamente através do desenvolvimento de um protótipo num canal bidimensional tendo em vista a análise das consequências para posterior previsão e alerta dos mesmos.

Nos ensaios de estabilidade, o método de análise vulgarmente utilizado é o da contagem visual do número de movimentos e quedas dos blocos que compõem o manto resistente do quebra-mar, estando esta técnica condicionada pela experiência do observador. Os métodos de análises da agitação frequentemente utilizados são o da análise espectral (baseado num espectro de energia) e o da análise temporal (ao longo do tempo) sendo necessário uma ferramenta informática, como é o caso do SAM (Software de Análise de Agitação Marítima), para geração de agitação, aquisição de registos e posterior facilidade na análise.

Foram então realizados ensaios em modelo físico reduzido no canal de ondas irregulares do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O perfil da seção utilizado foi a zona do cais do quebra-mar sul da Praia da Vitória tendo sido testados os períodos de pico de 10s, 14s e 18s associados a diferentes alturas significativas entre 5.50m e 9.00m para dois níveis de maré (Preia-mar e Baixa-mar).

**Palavras-chave:** Quebra-mar de talude, Ensaios em modelo reduzido, Análise da Estabilidade, Análise Espectral, Análise Temporal.

## **ABSTRACT**

The work was done due to the need to simulate events such as storms, namely through the development of a prototype in a two-dimensional channel in order to analyze the consequences for later forecasting and alert them.

In the stability tests, the method of analysis commonly used is the visual counting of the number of movements and falls of the elements that make up armor layer of the breakwater. This technique is mainly conditioned by the experience of the observer.

The frequently used wave conditions analysis methods are spectral analysis (based on an energy spectrum) and the time analysis, both requiring a computer tool, as is the case of SAM. This tool is used for generation of agitation, acquisition and easy analysis of the data collected in scale model tests.

Tests were conducted on a two-dimensional scale model in one of the irregular wave flumes at Ports and Marine Structures Section (NPE) of the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC). The mooring area of the southern breakwater of Praia da Vitória harbor was used as the cross section, and the tested peak periods were 10s, 14s and 18s associated with different significant wave heights between 5.50 and 9.00 meters for high and low tides.

**Keywords:** Breakwaters, Two-dimensional Scale Test, Stability Analysis, Spectrum Analysis, Time Analysis

## **AGRADECIMENTOS**

Este estágio e dissertação não teriam sido possíveis sem diversas participações. Esta página é dedicada a todos aqueles que de uma ou de outra forma contribuíram para o desenvolvimento deste projeto.

Em primeiro lugar um sincero agradecimento aos meus orientadores: o Professor Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos, docente do ISEL, à Engenheira Rute Maria Gomes de Lemos, do LNEC e à Doutora Conceição Juana Fortes, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O apoio foi de extrema importância e a partilha de conhecimento foi essencial desde o estágio, em que todos os dias foram uma lição, até à escrita da dissertação.

Em segundo lugar ao André Ramos e ao Francisco Pedro pelo apoio e companheirismo durante a realização dos ensaios.

A todos os meus amigos que me ajudaram a ultrapassar mais esta etapa da minha vida, sempre com uma palavra amiga, um apoio de força constante e muito importante.

Uma referência especial a todos os que me acompanharam nas duras noites de estudo durante todo o mestrado e durante a escrita da dissertação no ISEL.

Por último, aos meus pais pelo investimento e por terem sempre acreditado no meu potencial enquanto pessoa e enquanto profissional, sem eles nada seria possível.  
Obrigado

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Importância e objetivos do trabalho.....	1
2. GENERALIDADES SOBRE QUEBRA-MARES .....	4
2.1. Tipos de Quebra-mar .....	4
2.1.1. Quebra-mar de Taludes.....	7
2.1.2. Quebra-mar Vertical .....	9
2.1.3. Quebra-mar Misto.....	10
2.2. Principais ações e modos de falha .....	11
2.3. Pré-Dimensionamento Hidráulico de um Quebra-mar de Taludes.....	16
3. MODELO FÍSICO REDUZIDO .....	21
3.1. Considerações Gerais.....	21
3.2. Relação de Semelhança e Escolha da Escala .....	24
3.3. Fontes de Erros e Efeitos de Escala .....	27
4. NOÇÕES TEÓRICAS SOBRE AGITAÇÃO MARÍTIMA .....	29
4.1. Geração de Ondas e Teoria Linear .....	29
4.2. Método do Zero Ascendente .....	35
4.3. Método de Análise Espectral .....	36
5. CASO DE ESTUDO .....	39
6. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO BIDIMENSIONAL.....	42

6.1.	Agitação Incidente e Níveis de Maré.....	45
6.2.	Equipamento de medição .....	48
6.3.	Calibração das Sondas e Aquisição de Dados.....	50
6.4.	Ferramenta SAM (Simulação de Agitação Marítima).....	53
6.5.	Metodologia dos Ensaios .....	60
7.	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	61
7.1.	Análise de Agitação .....	61
7.1.1.	Análise Temporal .....	61
7.1.2.	Análise Espetral.....	68
7.2.	Análise da Estabilidade.....	77
7.2.1.	Quedas.....	78
7.2.2.	Movimentos.....	89
7.2.3.	Confirmação Teórica pela Fórmula de Hudson.....	96
8.	CONCLUSÕES .....	99
9.	REFERÊNCIAS.....	101
	ANEXO 1 – ANÁLISE ESPETRAL VS ANÁLISE TEMPORAL.....	106
	ANEXO 2 – PREIA-MAR VS BAIXA-MAR PARA ANÁLISE ESPETRAL .....	109
	ANEXO 3 – PREIA-MAR VS BAIXA-MAR PARA ANÁLISE TEMPORAL.....	111
	ANEXO 4 – CONTAGEM DE MOVIMENTO E DE QUEDAS .....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Blocos artificiais. Tetrápodos (Capitão, 2017) .....	4
Figura 2 – Blocos artificiais. Cubos Antifer (Silva, 2015).....	5
Figura 3 – Representação esquemática de perfis transversais de três tipos de quebra mares (Lopes, 2013).....	6
Figura 4 – Elementos constituintes do perfil-tipo de um quebra-mar de talude (Cruz 2008).....	7
Figura 5 – Perfil Tipo de um Quebra-Mar Vertical (Alfredini e Arasaki, 2009) .....	9
Figura 6 – Quebra-mar misto na vertical (U. S. Army Corps of Engineers, 2006).....	10
Figura 7 – Quebra-mar misto na horizontal (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)....	11
Figura 8 – Falha de um quebra-mar vertical devido a: a) Deslizamento; b) Derrubamento; c) Escorregamento do subsolo; (Pedro, 2015) .....	13
Figura 9 – Falha de um quebra-mar vertical devido a: a) Erosão da camada de fundação; b) Erosão do fundo marinho; c) Instabilidade parcial da estrutura (Pedro, 2015).....	13
Figura 10 – Modos de falha de quebra-mares de talude (CEM 2006).....	14
Figura 11 – Instabilidade hidráulica do manto resistente. 1— Deslocamento do manto resistente próximo do NMM; 2— Erosão do filtro e do núcleo (desenvolvimento de perfil em S); 3— Arrastamento do coroamento da estrutura; (U. S. Army Corps of Engineers, 2006) .....	14
Figura 12 – Modos de falha da superestrutura devido a: a) Erosão a barlar; b) erosão a sotamar; c) Deslizamento; d) Derrubamento; e) Falha nos materiais; .....	15
Figura 13 – Organograma de pré-dimensionamento de um quebra-mar (Pita, 1985) ....	16
Figura 14 – Blocos artificiais de betão (U. S. Army Corps of Engineers, 2006) .....	18

Figura 15 – Secção transversal para um quebra-mar de taludes exposto de ambos os lados com condições de galgamento moderadas (U. S. Army Corps of Engineers, 2006) .....	20
Figura 16 – Modelos físicos tridimensionais .....	22
Figura 17 – Modelo Físico reduzido bidimensional .....	22
Figura 18 – Modelos físicos: a) Estabilidade e galgamentos; b) Agitação; c) Agitação e sobrelevação .....	24
Figura 19 – Classificação das ondas dependendo do período (Adaptado de Munk, 1950) .....	30
Figura 20 – Classificação dos níveis de profundidade do mar (Heitor 2014).....	31
Figura 21 – Perfil de uma onda sinusoidal (Ferreira 2016).....	32
Figura 22 – Exemplo de desfaseamento de ondas de 90° .....	33
Figura 23 – Método de cruzamento com o nível médio da superfície segundo o zero ascendente (Straioto, 2006) .....	35
Figura 24 – Superfície do oceano obtida pela sobreposição de diferentes ondas sinusoidais (Holthuijsen 2007) .....	38
Figura 25 – Vista Satélite da Praia da Vitória (Google Earth 2017) .....	39
Figura 26 – Localização no Mapa de Portugal da Praia da Vitória .....	40
Figura 27 – Campo de Esporões.....	41
Figura 28 – Quebra-Mar da Praia da Vitória após a tempestade.....	41
Figura 29 – Vista Lateral do COI1 .....	42
Figura 30 – Vista em planta do COI1 .....	43
Figura 31 – Implantação do modelo no canal .....	44

Figura 32 – Implantação do Perfil no modelo físico reduzido .....	44
Figura 33 – Diferença entre o Espectro JONSWAP e Pierson-Moskowitz.....	46
Figura 34 – Disposição das sondas ao longo do canal.....	48
Figura 35 – Fotografia elucidativa da disposição das sondas .....	48
Figura 36 – Sondas AWA0 e AWA1.....	49
Figura 37 – Sonda S1 .....	49
Figura 38 – Sondas S5, S6 e S7.....	50
Figura 39 – Sonda Resistiva.....	51
Figura 40 – Caixa de alimentação das sondas .....	51
Figura 41 – Equipamento de aquisição Spider 8 .....	52
Figura 42 – <i>Software</i> de registo de voltagem Catman Easy.....	52
Figura 43 – Estrutura do pacote de <i>software</i> SAM (Simulação da Agitação Marítima).....	53
Figura 44 – Estrutura do módulo SAM MOD 1 (Simulação Numérica) .....	54
Figura 45 – Estrutura do SAM MOD 9 (Utilidades) .....	54
Figura 46 – Geração do FIR (MOD 1).....	55
Figura 47 – Exemplo da interface com o utilizador numa simulação com base no espectro JONSWAP.....	55
Figura 48 – Interface com o utilizador numa aquisição de sinal proveniente de sondas no programa SAM .....	56
Figura 49 – Interface com o utilizador do SAM MOD 6 (Análise Temporal).....	57

Figura 50 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 6 .....	58
Figura 51 – Interface com o utilizador do SAM MOD 7 (Análise Espetral) .....	58
Figura 52 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 7 .....	59
Figura 53 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 7 .....	59
Figura 54 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré BM .....	62
Figura 55 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré PM .....	63
Figura 56 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré BM .....	64
Figura 57 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré PM .....	66
Figura 58 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré BM .....	67
Figura 59 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré PM .....	68
Figura 60 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré de BM .....	69
Figura 61 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré de PM .....	70
Figura 62 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de BM .....	72
Figura 63 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de PM .....	73

Figura 64 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré de BM.....	74
Figura 65 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré de PM .....	75
Figura 66 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para $T_p=10$ s .....	79
Figura 67 – Quedas por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=10$ s.....	79
Figura 68 – Quedas acumuladas dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=10$ s.....	80
Figura 69 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=10$ s.....	80
Figura 70 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=10$ s.....	81
Figura 71 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para $T_p=10$ s .....	81
Figura 72 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para $T_p=10$ s.....	82
Figura 73 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para $T_p=14$ s .....	82
Figura 74 – Quedas por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=14$ s.....	83
Figura 75 – Quedas acumuladas dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=14$ s.....	83
Figura 76 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=14$ s.....	84
Figura 77 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=14$ s.....	84
Figura 78 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para $T_p=14$ s .....	85

Figura 79 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para $T_p=14s$ .....	85
Figura 80 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para $T_p=18s$ .....	86
Figura 81 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=18s$ .....	87
Figura 82 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para $T_p=18s$ .....	87
Figura 83 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para $T_p=18s$ .....	88
Figura 84 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para $T_p=18s$ .....	88
Figura 85 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=10s$ .....	90
Figura 86 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=10s$ .....	90
Figura 87 – Percentagem de movimentos dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=10s$ .....	91
Figura 88 – Grau de Movimentos para $T_p=10s$ .....	91
Figura 89 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=14s$ .....	92
Figura 90 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=14s$ .....	92
Figura 91 – Percentagem de movimentos dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=14s$ .....	93
Figura 92 – Grau de Movimentos para $T_p=14s$ .....	93
Figura 93 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=18s$ .....	94

Figura 94 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=18s$ .....	94
Figura 95 – Percentagem de movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para $T_p=18s$ .....	95
Figura 96 – Grau de Movimentos para $T_p=18s$ .....	95
Figura 97 – Variação de W em função dos tetrápodos utilizados .....	98

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Principais escalas de semelhança de Froude .....	26
Tabela 2 – Agitação Incidente e níveis de maré dos ensaios .....	47
Tabela 3 – Duração de cada ensaio.....	47
Tabela 4 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré BM .....	61
Tabela 5 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré PM .....	62
Tabela 6 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré BM .....	63
Tabela 7 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré PM (Hs = 5.5 a 7.5) .....	65
Tabela 8 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré PM (Hs = 8.0 a 9.0) .....	65
Tabela 9 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré BM .....	66
Tabela 10 – Resultados obtidos pelo programa SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré PM .....	67
Tabela 11 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré de BM.....	69
Tabela 12 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 10$ s e nível de maré de PM .....	70
Tabela 13 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de BM ( Hs = 5.5 a 7.5 ).....	71
Tabela 14 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de BM ( Hs = 8.0 e 8.5 ).....	71

Tabela 15 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de PM ( $H_s = 5.5$ a $7.5$ ).....	73
Tabela 16 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 14$ s e nível de maré de PM ( $H_s = 8.0$ a $9.0$ ).....	73
Tabela 17 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré de BM.....	74
Tabela 18 – Resultados obtidos pelo SAM para $T_p = 18$ s e nível de maré de PM .....	75
Tabela 19 – Critério de classificação de movimentos de blocos do manto resistente em ensaios bidimensionais.....	77
Tabela 20 – Critério de classificação de quedas de blocos do manto resistente em ensaios bidimensionais.....	78
Tabela 21 – Dados iniciais para o cálculo de $W$ .....	97
Tabela 22 – Valores de $W$ obtidos pela fórmula de Hudson.....	97
Tabela 23 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=10$ s BM .....	106
Tabela 24 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=10$ s PM.....	106
Tabela 25 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=14$ s BM .....	107
Tabela 26 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=14$ s PM.....	107
Tabela 27 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=18$ s BM .....	107
Tabela 28 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para $T_p=18$ s PM.....	108

Tabela 29 – Variação percentual para Análise Espectral de PM vs BM para $T_p=10s$ ...	109
Tabela 30 – Variação percentual para Análise Espectral de PM vs BM para $T_p=14 s$ ( $H_s=5.50$ a $7.50$ ) .....	109
Tabela 31 – Variação percentual para Análise Espectral de PM Vs BM para $T_p=14 s$ ( $H_s=8.00$ a $8.50$ ) .....	110
Tabela 32 – Variação percentual para Análise Espectral de PM Vs BM para $T_p=18 s$ .	110
Tabela 33 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para $T_p=10s$	111
Tabela 34 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para $T_p=14s$ ( $H_s=5.5$ a $7.5$ ).....	111
Tabela 35 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para $T_p=14s$ ( $H_s=8.0$ e $8.5$ ).....	112
Tabela 36 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para $T_p=18s$	112
Tabela 37 – Contagem de movimentos e quedas de PM para $T_p=10s$ .....	113
Tabela 38 – Contagem de movimentos e quedas de BM para $T_p=10s$ .....	113
Tabela 39 – Contagem de movimentos e quedas de PM para $T_p=14s$ .....	113
Tabela 40 – Contagem de movimentos e quedas de PM para $T_p=14s$ .....	114
Tabela 41 – Contagem de movimentos e quedas de PM para $T_p=18s$ .....	114
Tabela 42 – Contagem de movimentos e quedas de BM para $T_p=18s$ .....	114

## SIMBOLOGIA

a	Amplitude de onda (m)
BM	Nível de Baixa-Mar (m)
c	Celeridade (m/s)
$D_n$	Diâmetro nominal de um bloco (m)
f	Frequência ( $s^{-1}$ )
H	Altura de onda (m)
h	Profundidade do mar (m)
$H(T_{m\acute{a}x})$	Altura de onda correspondente ao período máximo (m)
$H_m$	Altura de onda média (m)
$H_{m\acute{a}x}$	Altura de onda máxima (m)
$H_s$	Altura Significativa (m)
k	Número de onda angular (rad/m)
$K_D$	Coefficiente de estabilidade de Hudson (adimensional)
$K_s$	Constante de calibração das sondas resistivas (cm/cV)
$K_\Delta$	Coefficiente de forma (adimensional)
L	Comprimento de onda (m)
n	Número de camadas de blocos do manto (adimensional)
PM	Nível de Preia-Mar (m)
r	Espessura do manto resistente (m)
$R_e$	Número de Reynolds (adimensional)
T	Período de onda (s)
$T(H_{m\acute{a}x})$	Período correspondente à altura de onda máxima (s)

$T_m$	Período Médio (s)
$T_{m\acute{a}x}$	Período máximo (s)
$T_p$	Período de pico (s)
TR	Tempo de registo (s)
$T_s$	Período significativo (s)
W	Peso de cada bloco do Manto Resistente (kN)
$W_m$	Massa dos blocos no modelo (g)
$W_p$	Massa dos blocos no protótipo (kg)
ZH	Zero Hidrográfico (m)
$\alpha$	Ângulo do talude com a horizontal (grau)
$\gamma$	Viscosidade Cinemática (m <sup>2</sup> /s)
$\gamma_r$	Peso específico do material constituinte do bloco de betão (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_w$	Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )
$\Delta_m$	Densidade submersa no modelo (adimensional)
$\Delta_p$	Densidade submersa no protótipo (adimensional)
$\varepsilon$	Ângulo de fase (rad)
$\lambda$	Escala do modelo (1/ $\lambda$ )
$\rho_{n,m}$	Massa volúmica dos blocos de proteção no modelo (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{n,p}$	Massa volúmica dos blocos de proteção no protótipo (kg/m <sup>3</sup> )
$\omega$	Frequência ou velocidade angular (rad/s)

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Importância e objetivos do trabalho

A determinação dos galgamentos de estruturas marítimas em zonas portuárias e costeiras é um assunto de elevada importância para a avaliação, quer do risco de falha das próprias estruturas, quer dos riscos associados à inundação das zonas por estas protegidas. No âmbito das atividades portuárias, a preocupação com o galgamento de estruturas marítimas resulta dos prejuízos que lhe podem estar associados: inoperacionalidade dos postos de acostagem, danos nos equipamentos, e viaturas ou edifícios protegidos pelas estruturas galgadas, danos em navios amarrados, ferimentos em pessoas que em último caso podem levar à perda de vidas.

Por essa razão, considera-se importante dotar as autoridades nacionais de um sistema de previsão e alerta que, com a devida antecedência, informe da possibilidade de ocorrência de situações de emergência e permita a adoção por essas entidades de medidas para evitar vítimas e minimizar prejuízos económicos e ambientais. Além disso, é importante que esse sistema seja também uma ferramenta de gestão a longo prazo, permitindo simular cenários futuros que considerem as mudanças provocadas pelas alterações climáticas, nomeadamente o aumento do nível médio das águas do mar e da ocorrência de fortes tempestades. Só deste modo, é possível fazer um planeamento e uma gestão integrada e sustentada das zonas portuárias e costeiras.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, tem vindo a desenvolver uma metodologia para avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos em estruturas marítimas (Santos et al., 2011, Reis et al., 2011, Neves et al., 2012, Rocha, 2012, Poseiro et al., 2014a, Poseiro et al., 2014b), implementada num sistema SIG que também contém a componente de previsão e alerta em tempo real e consequentemente consiste numa ferramenta de gestão e planeamento para as zonas portuárias e costeiras.

Esta metodologia consiste em:

- Definir o regime de agitação marítima incidente nas estruturas portuárias recorrendo a dados obtidos no local e/ou a resultados de modelos numéricos de geração e propagação de ondas, tais como WaveWatch III (Tolman, 1999), SWAN (Booij et al., 1999) e/ou DREAMS (Fortes, 1993);
- Calcular a resposta da estrutura em termos de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, com a utilização da ferramenta baseada em resultados da aplicação de redes neuronais artificiais NN\_Overtopping 2 (Coeveld et al., 2005), desenvolvida no âmbito do Projeto Europeu CLASH, e/ou de fórmulas empíricas;
- Calcular o grau de risco associado à ocorrência de galgamentos acima de um determinado caudal médio pré-definido para cada estrutura, em função do tipo de estrutura galgada e das atividades e bens por ela protegidos.

A aplicação desta metodologia já foi efetuada a vários portos portugueses, como é o exemplo do porto de Sines (Neves et al., 2009) e dos portos da Praia da Vitória (Poseiro et al., 2013, 2014a, b) e de Ponta Delgada (Pereira et al., 2014), ambos localizados nos Açores.

Para a calibração/validação do sistema, e em particular, das ferramentas utilizadas para cálculo da agitação marítima e do galgamento de estruturas portuárias, é importante a realização de ensaios em modelo físico reduzido que permitam obter dados específicos dos casos de estudo em análise em ambientes controlados.

Neste âmbito, foi realizado um conjunto de ensaios bidimensionais em modelo físico relativos ao projeto HIDRALERTA, num canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) do perfil tipo do quebra-mar sul do porto da praia da Vitória, que protege o cais 12, para análise da propagação de ondas, da estabilidade do pé do talude e do galgamento daquele perfil. Embora tenha sido um dos alvos de estudo do projeto HIDRALERTA, o presente trabalho não teve como alvo o estudo do galgamento.

Assim, os objetivos destes ensaios foram:

- Análise da propagação de ondas ao longo do canal;
- Análise da estabilidade do perfil tipo do quebra-mar sul, na zona do cais 12;
- Análise da estabilidade do pé do talude.

No presente relatório apresenta-se a análise da propagação de ondas ao longo do canal. Os resultados apresentados correspondem a dois tipos de análise a primeira relativamente à agitação marítima, análise temporal e espectral, a segunda incidiu sobre a estabilidade através do estudo da evolução do dano ao longo dos ensaios. Posteriormente foi realizada uma confirmação teórica dos resultados obtidos com a análise de estabilidade comparando-os com os resultados da aplicação da equação de Hudson.

Assim, no capítulo 2 apresentam-se algumas generalidades sobre quebra-mares, no capítulo 3 a descrição do modelo físico, no capítulo 4, algumas noções sobre agitação marítima bem como os dois principais métodos de análise de agitação marítima utilizados e no capítulo 5 a descrição do caso de estudo. A descrição dos ensaios realizados, da metodologia adotada, do equipamento técnico e das ferramentas informáticas utilizadas é feita no capítulo 6. Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se os resultados obtidos. O relatório termina com as principais conclusões do trabalho realizado.

## **2. GENERALIDADES SOBRE QUEBRA-MARES**

### **2.1. Tipos de Quebra-mar**

Um quebra-mar é uma estrutura que possibilita a criação de uma zona abrigada em áreas costeiras, utilizada geralmente para fins portuários. Tal estrutura pode ser apresentada com várias configurações em função das características da agitação marítima e da morfologia do local, bem como do tipo de operações pretendidas na área a proteger.

Uma estrutura como um quebra-mar de talude pode ser composta por enrocamento natural ou por blocos artificiais de betão que podem ter diferentes formas, sendo o tetrápodo (Figura 1) e o cubo de Antifer (Figura 2) os mais utilizados na costa portuguesa.



**Figura 1 – Blocos artificiais. Tetrápodos (Capitão, 2017)**



**Figura 2 – Blocos artificiais. Cubos Antifer (Silva, 2015)**

Como exemplos de funções dos quebra-mares podemos referir as seguintes:

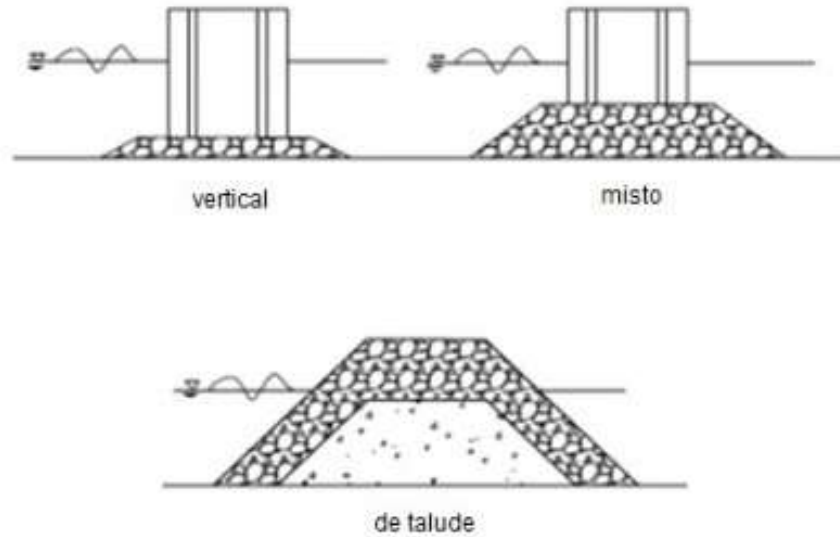
- Permitir a atracação de navios;
- Garantir a segurança das operações de carga e descarga de navios;
- Proteger as instalações portuárias;
- Melhorar as condições de manobra na entrada de portos.

Segundo o Coastal Engineering Manual Part IV.2 (USACE, 2006), um quebra-mar tem como objetivo proteger as entradas das bacias portuárias das ondas e correntes marítimas dissipando e ou refletindo a energia das mesmas.

Os principais tipos de quebra-mares estão ilustrados na Figura 3 e podem classificar-se como:

- Quebra-mar de talude;
- Quebra-mar vertical;

- Quebra-mar misto.



**Figura 3 – Representação esquemática de perfis transversais de três tipos de quebra mares (Lopes, 2013)**

Os quebra-mares podem ter dos tipos de denominações, enraizados, no caso de existir ligação à terra, caso contrário serão denominados destacados.

A seleção do quebra-mar que se pretende utilizar depende dos seguintes fatores:

- Disponibilidade de materiais utilizados na construção;
- Disponibilidade do equipamento adequado à construção;
- Profundidade do local de implantação;
- Função do quebra-mar no porto.

### 2.1.1. Quebra-mar de Taludes

Os quebra-mares de taludes são o tipo de quebra-mar mais usual em Portugal. Neste tipo de quebra-mar, a onda perde energia por rebentação, por atrito e pela formação de uma emulsão ar-água, sendo a restante energia refletida para o largo.

As principais vantagens deste tipo de quebra-mar são:

- Facilidade de construção;
- Pode ser construído em fundos sem características de resistência especiais e irregulares;
- Manutenção simples;
- Não têm limitações devido à profundidade.

Porém, a necessidade de grandes quantidades de materiais de construção e a manutenção periódica são vistas como as principais desvantagens.

Na Figura 4 encontra-se representado um perfil tipo de quebra-mar de taludes:

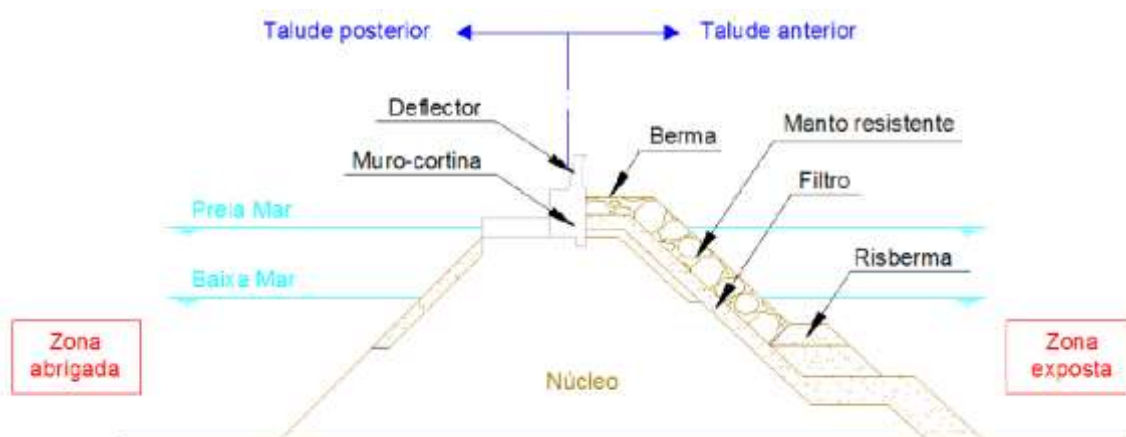


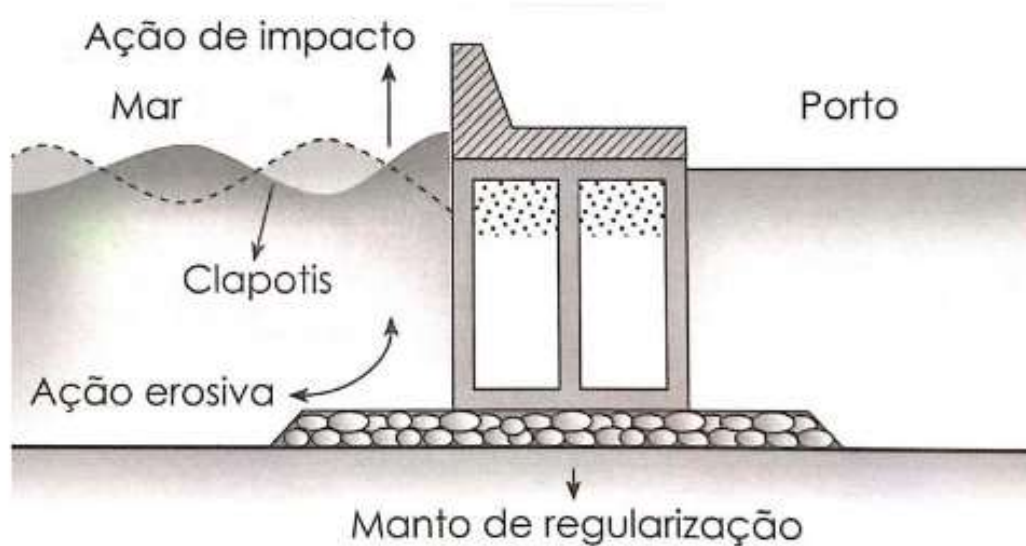
Figura 4 – Elementos constituintes do perfil-tipo de um quebra-mar de talude (Cruz 2008)

Em seguida encontram-se listadas as definições de cada designação segundo Pita (1985):

- Talude Anterior – Zona do quebra-mar que resiste diretamente à ação das ondas provenientes do largo;
- Manto Resistente – Faixa externa do talude anterior, sujeita à ação direta das ondas. É constituída por blocos naturais ou artificiais, geralmente colocados em duas camadas (superior e inferior);
- Filtros – Zona constituída por uma ou mais camadas de enrocamento, com a finalidade de evitar a saída de finos do núcleo e de aumentar a porosidade do talude anterior;
- Núcleo – Zona de enchimento, localizada no interior do quebra-mar e geralmente constituída por enrocamento “todo-o-tamanho” (TOT);
- Banqueta – Remate inferior do manto resistente, constituído por um prisma de enrocamento;
- Coroamento – Superfície que contém o ponto de cota máxima do quebra-mar;
- Berma – Superfície horizontal de coroamento do talude inferior;
- Superestrutura – Bloco de betão ou de alvenaria, em geral maciço, de coroamento destinado a facilitar o acesso e em certos casos permite reduzir o galgamento;
- Muro-cortina – Faz parte da superestrutura que é destinada a reduzir o galgamento, podendo ainda a sua superfície anterior funcionar como defletor do jato de galgamento;
- Talude Posterior – Zona do quebra-mar do lado da área abrigada.

### 2.1.2. Quebra-mar Vertical

Segundo a definição de Alfredini e Arasaki (2009), estes quebra-mares são estruturas formadas por uma parede vertical, impermeável, constituída por caixões de betão armado preenchidos com areia, blocos maciços de betão ou estacas-pranchas e cujas fundações são constituídas por um simples manto de regularização de enrocamento. A Figura 5 ilustra a seção transversal de um perfil de um quebra-mar de parede vertical.



**Figura 5 – Perfil Tipo de um Quebra-Mar Vertical (Alfredini e Arasaki, 2009)**

Os quebra-mares verticais são frequentemente preferidos em águas profundas, já que a quantidade de enrocamento necessária para a construção de um maciço trapezoidal aumenta significativamente com o aumento da profundidade. A profundidade à qual os quebra-mares de parede vertical se tornam mais económicos varia de acordo com o local, mas existe uma preferência geral em utilizar este tipo de estrutura, assim como os quebra-mares mistos a profundidades maiores ou iguais a 15 m. (CIRIA;CUR; CETMEF, 2007).

Quanto ao funcionamento hidráulico, os quebra-mares de parede vertical refletem as ondas incidentes de volta ao mar, produzindo uma onda estacionária (denominada “clapotis”) a montante da estrutura, formada pela sobreposição das ondas incidentes e refletidas. (Alfredini e Arasaki, 2009).

A única forma de transmissão da energia das ondas através deste tipo de estrutura é por galgamento. Portanto, em situações onde a agitação da água no interior da bacia abrigada pelo quebra-mar tiver que ser muito restringida, é mais recomendável a utilização deste tipo de estrutura do que a utilização do quebra-mar de talude.

### 2.1.3. Quebra-mar Misto

Os quebra-mares mistos na vertical (Figura 6) são constituídos por um prisma de enrocamento que se prolonga desde o fundo até uma determinada cota, a partir dessa mesma cota desenvolve-se uma estrutura semelhante à dos quebra-mares verticais. O quebra-mar reflete as ondas de menor altura comportando-se como um quebra-mar vertical enquanto as ondas maiores rebentam no talude comportando-se então como um quebra-mar de talude.

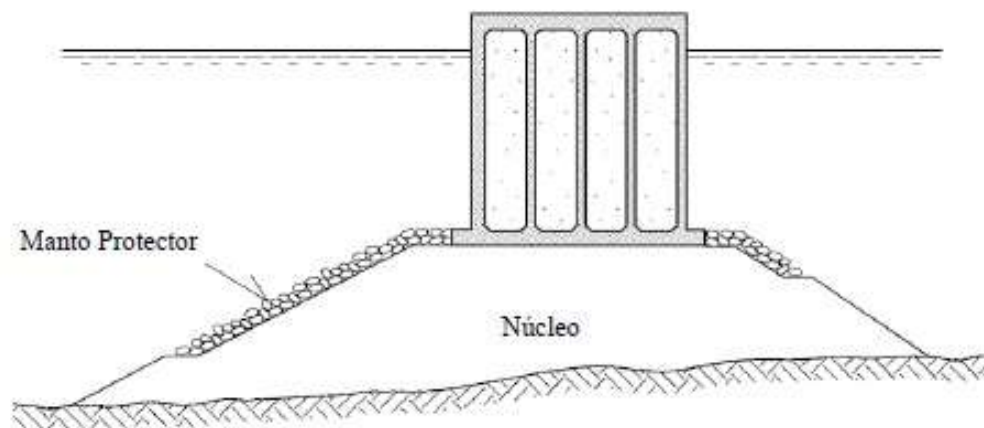
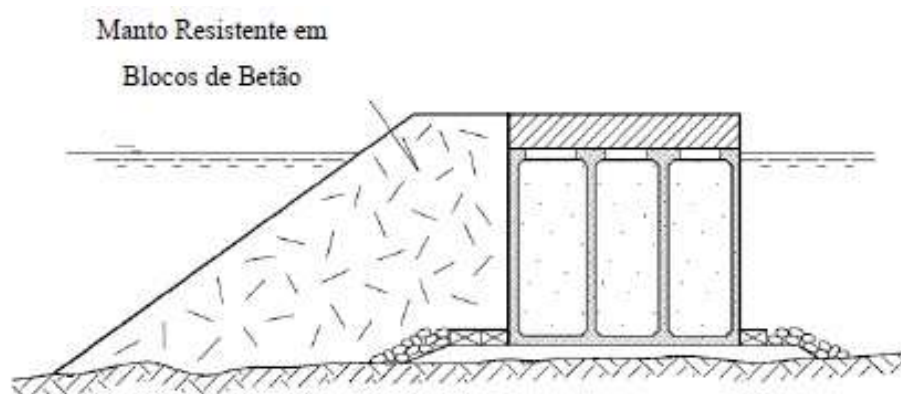


Figura 6 – Quebra-mar misto na vertical (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)

Os quebra-mares mistos na horizontal são constituídos por um manto resistente em blocos de betão ou enrocamento que se estende até ao topo dos caixotões (Figura 7).

Os quebra-mares mistos na horizontal são tipicamente utilizados em águas pouco profundas. O objetivo do manto resistente, colocado na frente do caixotão, é reduzir a reflexão, o impacto e o galgamento da agitação incidente.



**Figura 7 – Quebra-mar misto na horizontal (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)**

## **2.2. Principais ações e modos de falha**

As principais ações sobre um quebra-mar a ter em consideração são: a agitação marítima, as correntes, as marés, os sismos e os *tsunamis*. De todas estas ações, a ação que tem um maior impacto e influência na estrutura de abrigo é a agitação marítima, por ser a mais recorrente e a que mais contribui para as falhas da estrutura.

Dá-se o nome de falha a um resultado de um dano provocado na estrutura e que leva a um desempenho ou funcionalidade inferior ao mínimo antecipado pelo projetista.

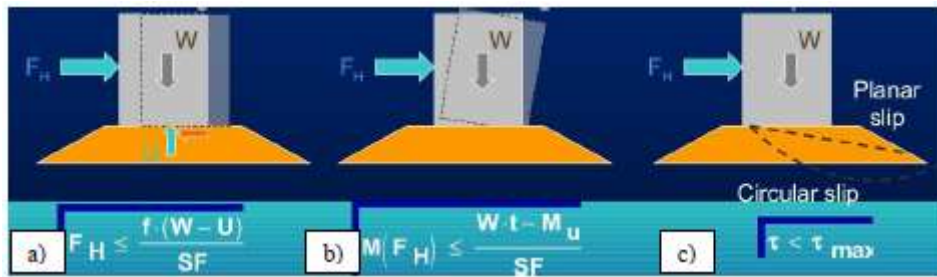
Segundo Pedro (2015) os diferentes modos de falha podem ser separados em:

- Falha de projeto: a estrutura ou partes da mesma não resistem às solicitações estabelecidas no projeto;

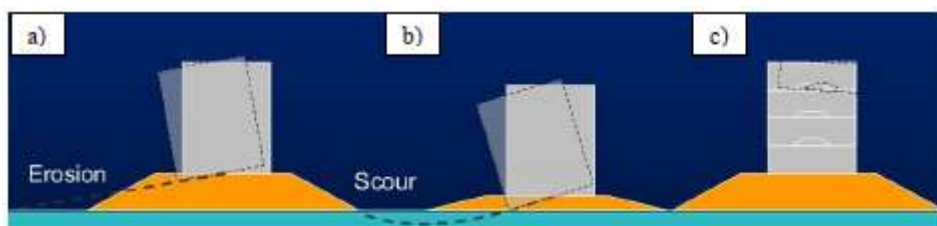
- Falha por excesso de solicitação: as solicitações estabelecidas no projeto são excedidas;
- Falha de construção: resulta da utilização de procedimentos, técnicas ou de materiais de construção incorretos ou de má qualidade;
- Falha por deterioração: é consequência da deterioração da estrutura e da falta de manutenção da mesma.

Os modos de falha mais associados aos quebra-mares verticais são:

- Deslizamento do caixotão: devido ao fato da força horizontal da agitação exceder a força de atrito entre a base do caixotão e a camada de fundação. (Figura 8 a))
- Assentamento vertical: devido à consolidação do solo;
- Derrubamento do caixotão por rotação em torno da aresta da base: ocorre quando o momento induzido pela agitação incidente supera o momento estabilizante devido ao peso do caixotão. Isto acontece quando o solo de fundação é rochoso ou muito resistente. (Figura 8 b))
- Falha por escorregamento do subsolo: ocorre quando a carga devido ao caixotão excede a resistência do solo. A superfície de rotura provoca a rotação do caixotão e seu assentamento (Figura 8 c))
- Erosão da fundação de enrocamento: ocorre devido à erosão da camada de enrocamento de fundação por parte da agitação que conseqüentemente conduz ao assentamento dos caixotões. (Figura 9 a))
- Falha da parede frontal dos caixotões: a falha pode ser causada devido ao excesso das cargas associadas à agitação marítima, deteriorando o betão armado ou devido a impactos de navios. Se existir uma fuga do enchimento do caixotão, este pode escorregar ou ser derrubado devido à diminuição da estabilidade.



**Figura 8 – Falha de um quebra-mar vertical devido a: a) Deslizamento; b) Derrubamento; c) Escorregamento do subsolo; (Pedro, 2015)**



**Figura 9 – Falha de um quebra-mar vertical devido a: a) Erosão da camada de fundação; b) Erosão do fundo marinho; c) Instabilidade parcial da estrutura (Pedro, 2015)**

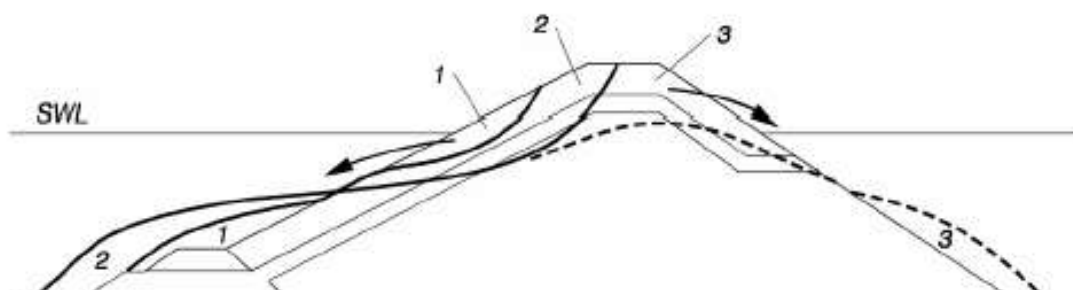
Do exibido anteriormente na Figura 8, verifica-se que é relativamente simples a quantificação das forças que atuam sobre um quebra-mar vertical, ao invés, das forças que atuam sobre um quebra-mar de taludes. Por outro lado, no caso de ocorrerem danos em quebra-mares verticais, estes serão mais graves porque implicam o movimento de grandes volumes comparativamente com os quebra-mares de talude.

Os modos de falha de um quebra-mar de taludes estão representados na Figura 10. Destes a erosão do manto resistente e a erosão da parte interna do coroamento aparecem como os fatores de maior importância.



**Figura 10 – Modos de falha de quebra-mares de talude (CEM 2006)**

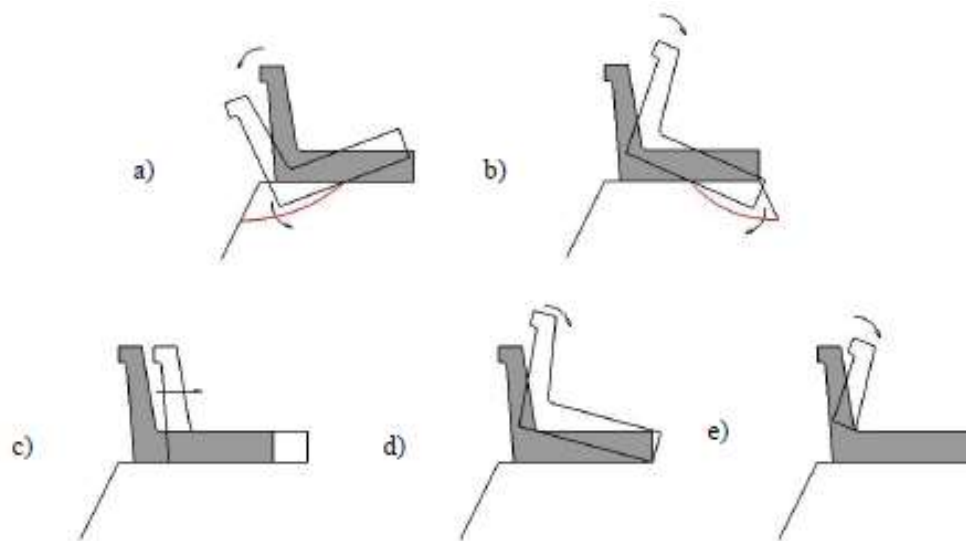
Segundo Pedro (2015), a instabilidade hidráulica do manto resistente é um modo de falha de desenvolvimento lento: começa com o deslocamento do material que compõe o manto protetor para próximo do nível médio do mar (NMM); posteriormente ocorre uma evolução até se dar a erosão do filtro e do núcleo desenvolvendo-se num perfil em S, seguindo-se a um arrastamento do coroamento da estrutura. (Figura 11)



**Figura 11 – Instabilidade hidráulica do manto resistente. 1— Deslocamento do manto resistente próximo do NMM; 2— Erosão do filtro e do núcleo (desenvolvimento de perfil em S); 3— Arrastamento do coroamento da estrutura; (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)**

Pedro (2015) refere ainda que os modos de falha associados à superestrutura encontram-se apresentados na Figura 12 e podem ser devidos a:

- Assentamento, devido a erosão na frente da superestrutura (barlamar) (a);
- Erosão da parte traseira do quebra-mar (sotamar) que conduz ao colapso da superestrutura (b);
- Deslizamento da superestrutura, que ocorre quando a força horizontal devida a agitação excede a força de atrito (c);
- Derrubamento em torno da aresta da base mais afastada da zona exposta (d);
- Falha nos materiais (e);



**Figura 12 – Modos de falha da superestrutura devido a: a) Erosão a barlamar; b) erosão a sotamar; c) Deslizamento; d) Derrubamento; e) Falha nos materiais;**

### 2.3. Pré-Dimensionamento Hidráulico de um Quebra-mar de Taludes

A estabilidade dos quebra-mares de taludes depende grandemente da estabilidade hidráulica do manto resistente, pelo que deve existir uma seleção cuidadosa das características dos blocos a utilizar. Ao longo do tempo foram desenvolvidos métodos empíricos dando uma representação satisfatória da estabilidade do manto resistente.

O organograma apresentado na Figura 13, representa uma primeira abordagem de pré-dimensionamento hidráulico com vista à seleção das características dos blocos a utilizar.

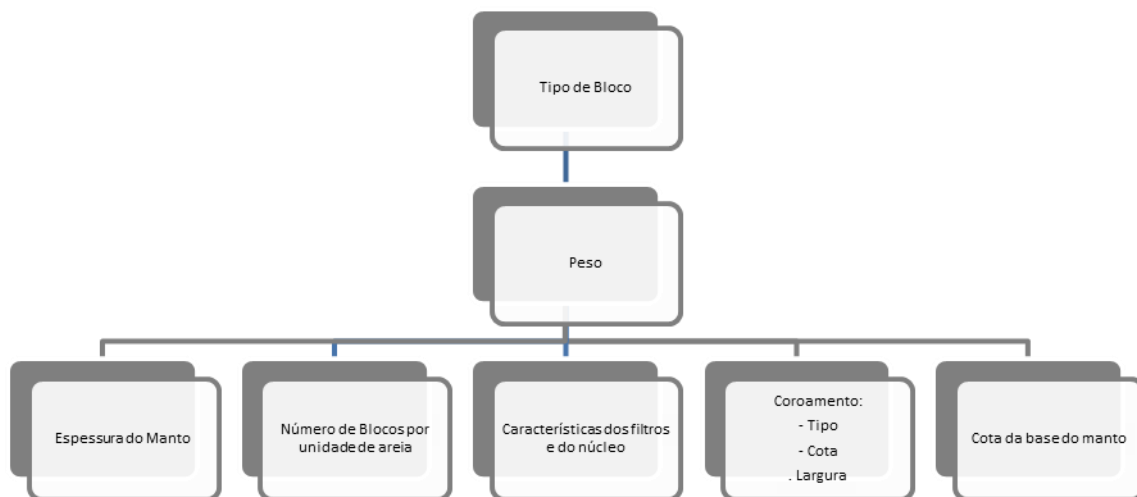


Figura 13 – Organograma de pré-dimensionamento de um quebra-mar (Pita, 1985)

Segundo Pita (1985), o projetista começa por escolher o tipo de bloco a empregar, o que é feito de molde a que o manto resistente seja:

- Estável sob a ação das ondas, com o menor peso possível dos blocos que o compõem (e ainda, no caso de blocos de betão, com o menor volume total de betão possível);
- Eficaz na dissipação da energia das ondas, reduzindo o espriamento.

A escolha é logicamente influenciada por outras causas, de que se salientam:

- Experiências anteriores com os vários tipos de blocos;
- Eventual pagamento de “direitos” para utilização de um dado tipo de elemento artificial;
- Disponibilidades previsíveis de equipamento de fabrico e colocação.

Os blocos podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os blocos naturais de enrocamento foram o principal material utilizado na construção de quebra-mares até ao momento em que apareceram os primeiros blocos artificiais. Os blocos artificiais foram concebidos para dar resposta à necessidade constante de aumentar o peso dos blocos e permitir novas geometrias 3D que melhorem a capacidade do conjunto de blocos funcionar como um todo, devido aos constrangimentos impostos pelos blocos vizinhos, isto é o chamado imbricamento. Com efeito, o peso necessário dos elementos do manto para satisfazer a estabilidade hidráulica do quebra-mar está, por vezes, muito acima da capacidade de fornecimento das pedreiras.

Os blocos artificiais podem assumir diferentes formas, a fim de tomar partido não só do peso mas também da sua geometria, permitindo uma dissipação da energia da agitação bem como a um aumento da capacidade de imbricamento fazendo com que o manto protetor trabalhe como um todo. A Figura 14 ilustra alguns tipos de blocos artificiais.

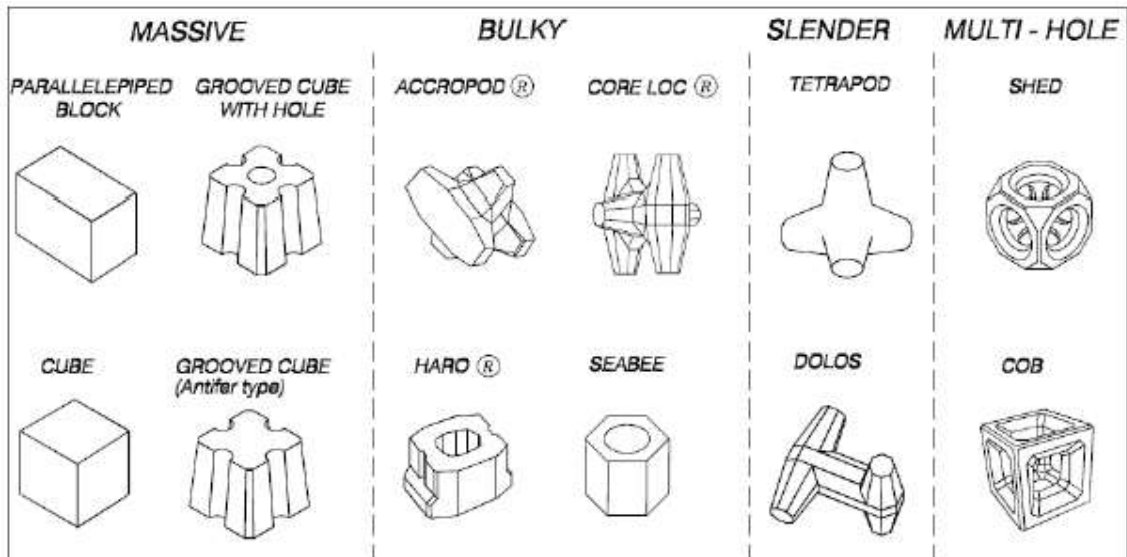


Figura 14 – Blocos artificiais de betão (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)

Após a escolha do tipo de bloco é possível calcular o peso individual dos blocos, e o número necessário para assegurar a estabilidade a uma dada inclinação do talude. Para a determinação do peso dos blocos é recorrente proceder-se à utilização da fórmula de Hudson, sendo esta, a mais utilizada pelos projetistas.

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

- W – Peso de cada bloco do manto resistente (kN);
- $\gamma_r$  – Peso específico do material constituinte do bloco de betão (24 kN/m<sup>3</sup>);
- $\gamma_w$  – Peso específico da água (1025 kN/m<sup>3</sup>);

- H – Altura de onda de projeto (m);
- $\alpha$  – Ângulo do talude com a horizontal (graus);
- $K_D$  – Coeficiente de estabilidade de Hudson (adimensional).

A espessura do manto resistente (r) é calculada através da Eq 2.

$$r = nk\Delta \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 2}$$

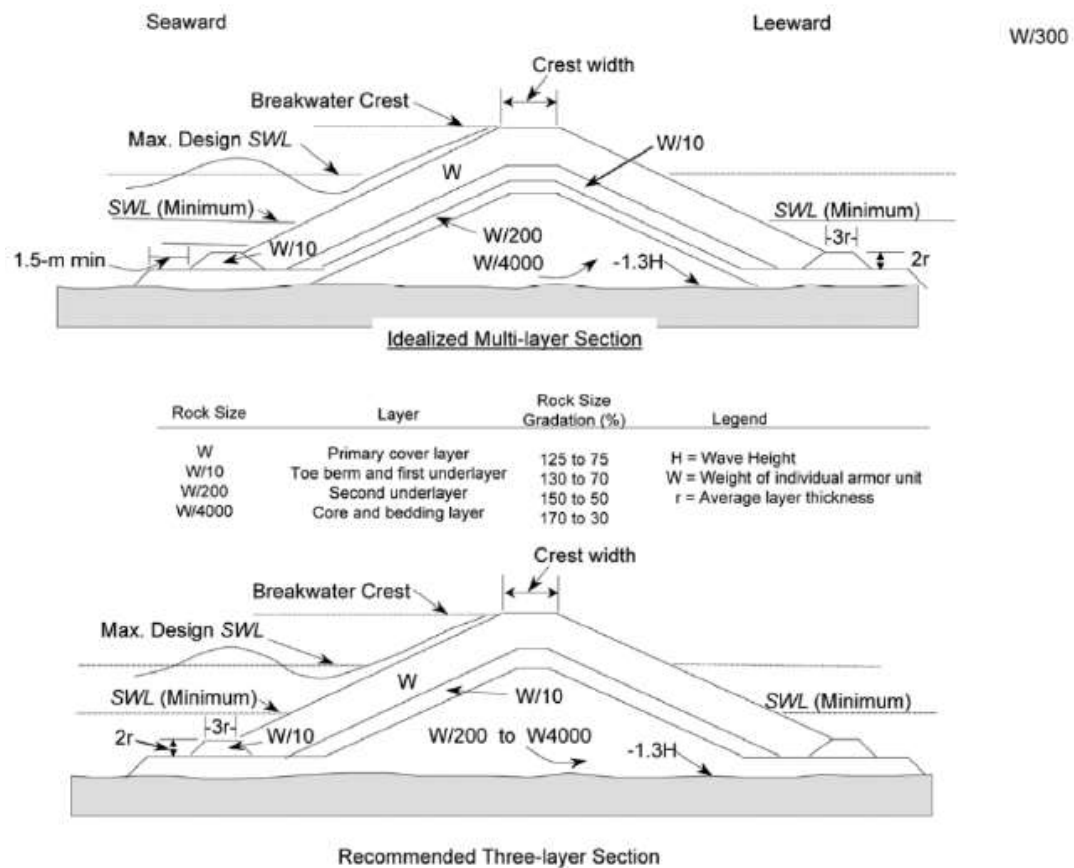
Sendo:

- r – Espessura do manto resistente (m);
- n – Número de camadas de blocos do manto (adimensional);
- $k_\Delta$  – Coeficiente de forma (adimensional);
- W – Peso de cada bloco do manto resistente (kN);
- $\gamma_r$  – Peso específico do material constituinte do bloco de betão (24 kN/m<sup>3</sup>).

O número de camadas a utilizar encontra-se associado ao tipo de bloco utilizado podendo variar entre três a quatro camadas quando são utilizados blocos naturais de enrocamento e duas camadas nos blocos artificiais de betão. Alguns tipos de blocos artificiais de betão, como é o caso dos ACCROPODE, XBlock e CORE-LOC, podem mesmo ser dispostos em camada única devido à sua alta capacidade de imbricamento.

O peso do material a utilizar no filtro dos quebra-mares pode ser estimado a partir do peso dos elementos do manto resistente. As dimensões da berma do pé do talude são

estimadas a partir da espessura do manto resistente, o tipo de exposição e condições de galgamento conforme exemplificado na Figura 15. A *Idealized Multi-layer Section*, segundo o U. S. Army Corps of Engineers é o modelo utilizado para um quebra-mar com várias camadas. Porém, existe uma recomendação para o caso de as camadas desejadas serem 3 que se encontra apresentado como *Three-layer Section*. Este método de pré-dimensionamento do manto resistente do quebra-mar carece, sempre, de confirmação da sua eficácia através de ensaios em modelo físico reduzido, onde é feita uma análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural do manto resistente. Estes ensaios são realizados à escala, utilizando-se a menor escala possível, de modo a obter um modelo o mais próximo possível do tamanho real por forma a reduzir efeitos de escala.



**Figura 15 – Secção transversal para um quebra-mar de taludes exposto de ambos os lados com condições de galgamento moderadas (U. S. Army Corps of Engineers, 2006)**

### **3. MODELO FÍSICO REDUZIDO**

#### **3.1. Considerações Gerais**

A modelação física é uma ferramenta utilizada em diversos ramos da engenharia durante o projeto de um protótipo como é o caso de um Quebra-mar. É também usada na calibração de modelos numéricos e permite representar fenómenos complexos de difícil representação e solução nos modelos numéricos e sobretudo permite uma visualização dos diversos fenómenos (Reis et al, 2015).

Segundo Wolters (2007) é indispensável recorrer-se a um modelo físico em problemas de engenharia costeira sempre que se pretenda uma otimização do projeto, quando o galgamento é o parâmetro mais importante a ser estudado, quando for necessária uma análise de fenómenos complexos como a rebentação e a transmissão, quando a batimetria ou a geometria da estrutura são complexas e quando as estruturas são compostas por um manto principal de blocos artificiais, sendo importante obter uma quantificação dos movimentos dos blocos.

A modelação física permite aprofundar o conhecimento de fenómenos que não são conhecidos na totalidade ou não foram descritos, permite a reprodução de fenómenos físicos sem as simplificações características dos modelos analíticos ou numéricos. Através da modelação física consegue-se obter ainda medições que servem para validar resultados teóricos e fenómenos complexos que até à data não tenha sido possível obter por métodos teóricos.

Os estudos em modelo físico em problemas de engenharia costeira podem dividir-se em tridimensionais e bidimensionais. Nos ensaios tridimensionais é reproduzida a linha de costa da zona em estudo, a batimetria e a geometria das obras, de modo a simular da melhor forma possível todos os fatores intervenientes nas características da agitação reproduzidas. Este tipo de ensaios é realizado em tanques de ondas (Figura 16).



**Figura 16 – Modelos físicos tridimensionais**

Nos ensaios bidimensionais reproduz-se apenas um trecho (secção transversal) da obra em estudo, sendo construídos e explorados em canais de ondas irregulares. Em ambos os casos, o objetivo dos ensaios é a análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural, face à ação da agitação marítima (Figura 17).



**Figura 17 – Modelo Físico reduzido bidimensional**

Um ensaio consiste, habitualmente, na atuação de um estado de agitação que é caracterizado por uma altura de onda significativa ( $H_s$ ), um período de pico ( $T_p$ ) que provém de uma determinada direção de agitação (rumo), para um determinado nível de maré.

Os ensaios em modelo físico (tridimensionais ou bidimensionais) podem ainda ser classificados segundo os seus objetivos. Poderão classificar-se, segundo os critérios utilizados no LNEC e abaixo enunciados:

- Ensaio de estabilidade: têm como finalidade quantificar e avaliar tanto as quedas como os movimentos dos elementos do manto resistente (blocos artificiais e/ou enrocamento) para cada troço da estrutura em estudo, quando sujeita à agitação marítima incidente. Na generalidade, esse tipo de avaliação é visual e permite determinar a percentagem de quedas e movimentos totais. Com base nessa percentagem, é atribuído um grau de classificação de quedas e movimentos (Lemos e Silva, 2004). Sendo esta observação visual, a experiência e a sensibilidade do observador condicionam os resultados obtidos;
- Ensaio de galgamento: englobam a quantificação e a qualificação visual do volume de água galgada assim como respetiva atribuição do grau do critério de classificação em uso no LNEC;
- Ensaio de agitação: consistem na aquisição dos dados das sondas colocadas nos locais onde se pretende estudar a agitação marítima e posterior cálculo dos índices de agitação, através de relações entre as alturas de onda ( $H_s$ ) verificadas em cada ponto de interesse e a verificada junto ao batedor.
- Ensaio de pressão: têm como propósito avaliar as pressões exercidas pela agitação marítima sobre determinados pontos da estrutura, através da utilização de sensores de pressão.

Todos os tipos de modelo físico contemplam uma 1ª fase de construção, onde é feita a preparação de todos os elementos a reproduzir, seguida da implantação da batimetria e da construção do modelo. Numa 2ª fase realiza-se a exploração do modelo, a qual

contempla a calibração da agitação marítima e a realização do programa de ensaios desejado. Por último, numa 3ª fase, procede-se à análise e interpretação dos dados obtidos bem como à preparação dos relatórios finais (Fortes et al., 2014).

Através da experiência obtida durante o estágio realizado no LNEC foi possível observar que o tipo de ensaios realizados com maior frequência são: a) ensaios de estabilidade e galgamentos de estruturas marítimas; b) ensaios de agitação de zonas abrigadas para avaliação das condições de tranquilidade; e c) ensaios de sobrelevação do nível médio do mar em zonas portuárias (Figura 18):



**Figura 18 – Modelos físicos: a) Estabilidade e galgamentos; b) Agitação; c) Agitação e sobrelevação**

### **3.2. Relação de Semelhança e Escolha da Escala**

É importante que o comportamento do modelo e do protótipo seja semelhante (semelhança modelo-protótipo) de modo a inferir dos ensaios o que se passa na realidade. Para tal, é necessário verificar-se a semelhança geométrica (relação constante entre comprimentos homólogos), cinemática (relação constante entre movimentos homólogos) e dinâmica (relação constante entre forças homólogas).

Para que todos os fenómenos envolvidos sejam bem reproduzidos à escala, ou seja, sejam os mesmos no modelo e no protótipo, os números de Froude, Weber, Reynolds, e Cauchy deveriam ser iguais no modelo e no protótipo. No entanto, estes critérios não podem ser satisfeitos simultaneamente. Assim, de acordo com os principais fenómenos

em jogo, opta-se por um destes números e com base nele definem-se as escalas do modelo.

Nos ensaios em modelo reduzido de quebra-mares, os principais fenómenos são associados a escoamentos em superfície livre, ou seja, as forças da gravidade e de inércia são extremamente importantes. A fim de garantir a semelhança entre os escoamentos no modelo e no protótipo é necessário respeitar a semelhança de Froude, isto é, terá de se garantir a igualdade entre o número de Froude no modelo e o número de Froude no protótipo.

É necessário ter em conta que a semelhança de Froude só será relevante quando as forças de viscosidade, sempre presentes, forem desprezáveis em relação às forças de gravidade e de inércia.

De modo a assegurar que o escoamento nas camadas do manto de proteção é turbulento no modelo (tal como no protótipo, sob as condições de projeto), deverá ser cumprido o seguinte critério relativo ao número de Reynolds ( $R_e$ ) (Eq.3):

$$R_e = \frac{\sqrt{gH_s D_n}}{\nu} \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

- $R_e$  – Número de Reynolds;
- $H_s$  – Altura significativa (m);
- $D_n$  – Diâmetro nominal de um bloco (m);
- $g$  – Aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );
- $\nu$  – Viscosidade cinemática da água ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Os principais fatores de conversão entre o modelo e protótipo, tendo em conta a semelhança de Froude, estão apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1 – Principais escalas de semelhança de Froude**

<b>Parâmetros</b>	<b>Conversão modelo-protótipo</b>
Equação	$\frac{u}{\sqrt{g l}} = \text{Constante}$
Comprimento/ Altura	$L_p = L_m \cdot \lambda$
Área	$A_p = A_m \cdot \lambda^2$
Volume	$V_p = V_m \cdot \lambda^3$
Tempo/ Período	$T_p = T_m \cdot \sqrt{\lambda}$
Velocidade	$U_p = U_m \cdot \sqrt{\lambda}$

A relação entre as massas dos blocos no modelo e no protótipo é dada pela Eq.4. Esta equação é essencial para a determinação da escala do modelo, pois garante que o número de estabilidade entre o protótipo e o modelo são iguais, e permite determinar a mesma conhecendo o peso dos blocos do modelo que se querem utilizar e vice-versa.

$$W_m = \left( \frac{\Delta_p}{\Delta_m \lambda} \right)^3 \frac{\rho_{n,m}}{\rho_{n,p}} 1000 W_p \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

- $W_m$  – Massa dos blocos no modelo (g);
- $W_p$  – Massa dos blocos no protótipo (kg);
- $\rho_{a,m}$  – Massa volúmica dos blocos de proteção no modelo ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\rho_{a,p}$  – Massa volúmica dos blocos de proteção no protótipo ( $\text{kg/ m}^3$ );
- $\lambda$  – Escala do modelo ( $1/\lambda$ );
- $\Delta_m$  e  $\Delta_p$  – Densidade submersa no modelo e no protótipo, dada pela Eq.5:

$$\Delta = \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w} \quad \text{Eq. 5}$$

### 3.3. Fontes de Erros e Efeitos de Escala

Uma das principais fontes de erro deve-se ao comportamento do modelo, o qual não é uma reprodução exata do protótipo devido a distorções provocadas pela construção à escala e a impossibilidade de cumprir todas as razões de semelhança em simultâneo. Estes efeitos denominam-se efeitos de escala. Alguns exemplos de efeitos de escala são:

- Salpicos no modelo são também salpicos no protótipo;

- Escoamento através dos filtros do núcleo (a menor porosidade no modelo introduzirá menores perdas de carga);
- Galgamentos diferentes no modelo e no protótipo resultantes de uma incorreta reprodução da porosidade no modelo (o galgamento aumenta com a diminuição da porosidade);
- Influência da viscosidade da água na garantia de obtenção de escoamento ser turbulento.

Outra fonte de erro designada por efeitos de modelo, deve-se a distorções provocadas pelas condições de fronteira devido a limitações na construção e à exploração dos modelos, estando associado a reproduções incorretas de aspetos como a reflexão, rugosidade e materiais. Um aspeto importante a considerar nos efeitos de modelo é a não reprodução à escala da resistência mecânica dos materiais constituintes dos blocos. Os blocos no modelo têm uma resistência superior à do protótipo, pelo que não se verificam fissuras e roturas resultantes do choque entre eles ou de quedas (como acontece na realidade).

Fonte de erro em todos os ensaios em modelo físico são as medições e as incertezas inerentes à medida as quais poderão estar associadas ao equipamento e sua calibração.

Estas fontes de erro e incertezas refletem-se nos diferentes resultados obtidos, por exemplo:

- Na repetição dos testes (que necessitam de tratamento estatístico);
- Nas várias constantes de calibração do equipamento de medição do nível da superfície livre;
- Quando se utilizam diferentes sistemas de medição;
- Nas várias metodologias de avaliação dos danos.

## 4. NOÇÕES TEÓRICAS SOBRE AGITAÇÃO MARÍTIMA

A ação dos ventos (através de um mecanismo de transferência de energia) é a força responsável pela geração e propagação das ondas no oceano. Nas ondas de vento a principal força restabeecedora do equilíbrio é a força gravítica: (Capitão, 2013).

### 4.1. Geração de Ondas e Teoria Linear

A ação mais relevante a ter em consideração para um projeto de obras marítimas é a ação do vento. O vento, ao transferir energia para o oceano, gera onda de várias direções, alturas e períodos que podem percorrer grandes distâncias, estendendo-se em área, alterando as suas características à medida que se propagam e atingem obstáculos. As características de um estado de agitação gerado pelo vento podem depender de vários fatores como:

- Intensidade do vento;
- Tamanho da zona de geração, designado por fetch, que representa a distância sem interrupção em que o vento sopra numa determinada direção;
- Tempo em que o vento sopra sobre uma determinada direção.

Quanto maiores forem estes fatores maior energia irá ter o estado de agitação gerado. As ondas podem ainda dividir-se em três grupos: ondas capilares, que são ondas de pequena altura que aparecem com o vento e desaparecem quando este cessa; vagas, que são ondas em que têm como característica um período inferior a aproximadamente 8 s e geradas pelo vento local; e a ondulação (*swell*), que são ondas com um período superior a 8s e que se encontram fora da sua área de geração. A figura seguinte elucida a classificação das ondas dependendo do seu período.

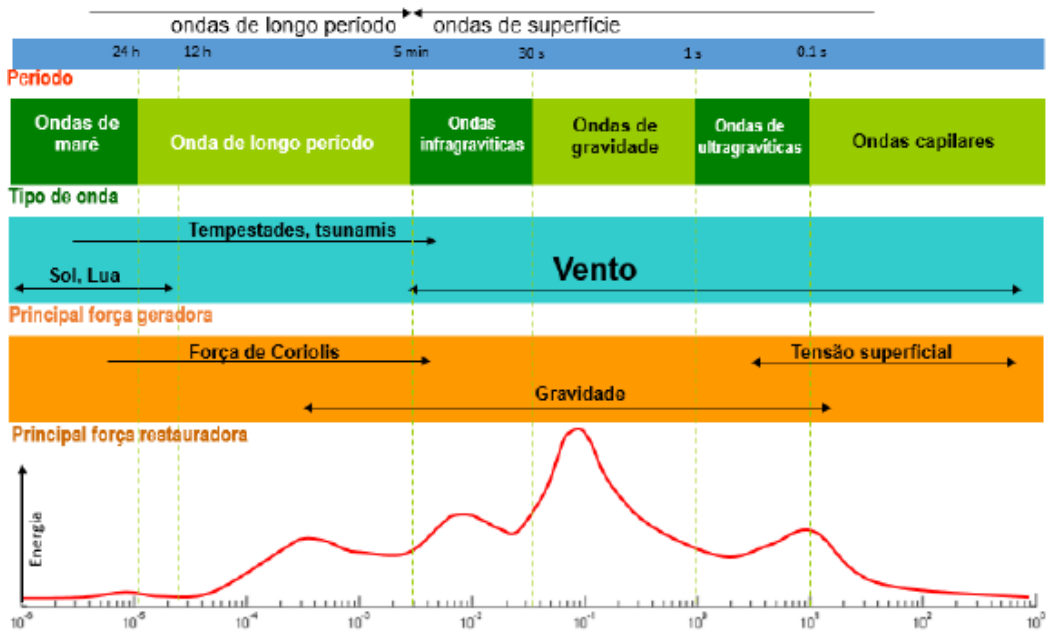


Figura 19 – Classificação das ondas dependendo do período (Adaptado de Munk, 1950)

É necessário classificar ainda as características das ondas em águas profundas, intermédias e pouco profundas. Os limites de transição para as diferentes profundidades são calculados através do parâmetro  $h$  (profundidade da água) e pelo parâmetro  $L$  (comprimento de onda), e podem ser visualizados na Figura 20.

Quando o período da onda é constante e a profundidade do mar diminui, a celeridade, o comprimento de onda também diminuem. Esta relação resulta da equação de dispersão (Eq. 6):

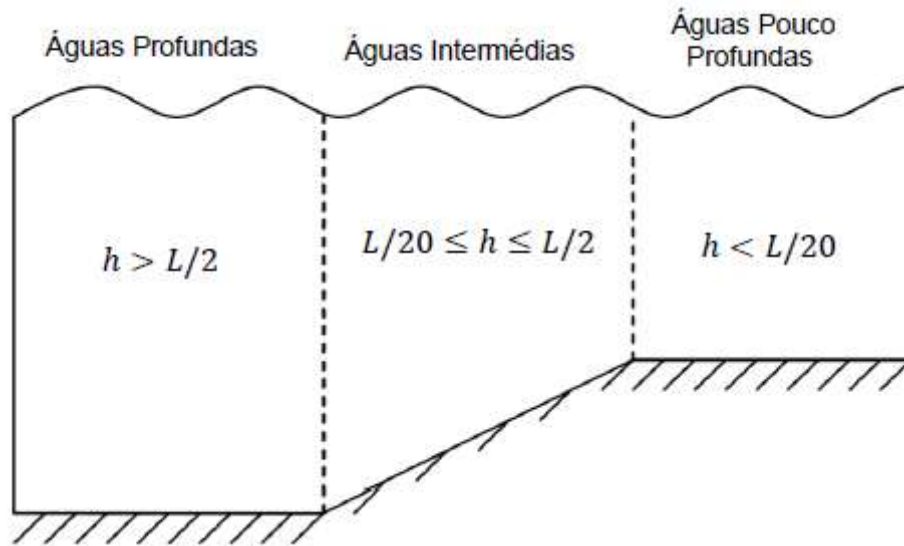
$$\omega = gk \tanh(kh) \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$k = 2\pi/L$  – número de onda;

$h$  – profundidade da água;

$g$  – aceleração gravítica



**Figura 20 – Classificação dos níveis de profundidade do mar (Heitor 2014)**

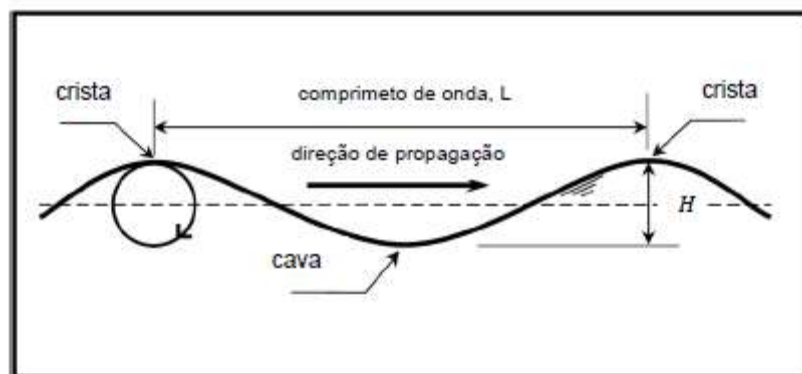
Em águas profundas, as ondas propagam-se com maior celeridade que em águas pouco profundas, o mesmo acontecendo com as ondas de maior comprimento de onda ou período.

A análise de séries temporais da elevação da superfície livre do mar revela que a sua configuração é bastante complexa e variável em cada instante, sendo caracterizada pelo comportamento aleatório que confere à superfície um aspeto irregular. Para caracterizar fisicamente uma onda do mar é necessário fazer a descrição da sua forma e do seu movimento em relação ao nível não perturbado da superfície livre. Ao longo dos anos inúmeras teorias foram desenvolvidas com o objetivo de representar matematicamente a posição da superfície livre da água, das quais a mais simples e a mais utilizada em grande parte dos problemas de engenharia marítima é a teoria linear de ondas. Esta

teoria, também conhecida por teoria de Airy, apesar de ser uma teoria relativamente simples, fornece boas aproximações para as características de onda. Contudo, a sua aplicabilidade contém algumas restrições para determinadas condições como é o caso da profundidade ser grande ou intermédia bem como para ondas de pequena amplitude relativa, isto é, pequenos valores da relação  $h/L$ .

Esta teoria propõe que a oscilação da superfície do mar seja aproximada por ondas harmónicas simples, ou seja, ondas cujo movimento possa ser representado através de equações matemáticas conhecidas recorrendo a funções sinusoidais. Isto significa que cada onda possui uma oscilação periódica, apresentando um andamento idêntico à das funções trigonométricas seno ou co-seno.

A Figura 21 ilustra uma onda genérica com andamento sinusoidal e com alguns parâmetros característicos da mesma.



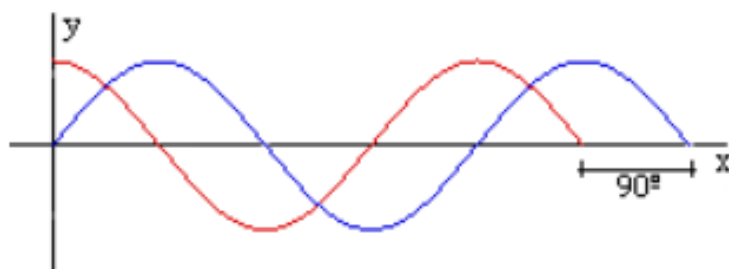
**Figura 21 – Perfil de uma onda sinusoidal (Ferreira 2016)**

Para descrever o movimento de uma onda são necessários conhecer os seguintes parâmetros:

- O comprimento de onda ( $L$ ), é a distância horizontal entre duas cristas ou duas cavas consecutivas;

- A amplitude de onda ( $a$ ), é o valor máximo do deslocamento vertical da superfície livre (seja da crista ou da cava) medido em relação ao nível médio da água do mar;
- A altura de onda ( $H$ ), é a diferença de cotas entre uma crista e uma cava que lhe seja adjacente, para uma onda regular, para uma onda regular a altura é igual a duas vezes a amplitude;
- O período de onda ( $T$ ), é o intervalo de tempo medido em segundos entre a passagem de duas cristas consecutivas por um ponto fixo, ou seja, é o tempo necessário para uma onda completar um ciclo;
- A frequência ( $f$ ), é o número de ciclos por segundo, isto é, o número de oscilações que uma onda completa num segundo e é correspondente ao inverso do período;
- A celeridade ( $c$ ), é a velocidade com que uma crista ou uma cava avançam, conhecida também como velocidade de onda ou velocidade de fase;
- A fase ( $\epsilon$ ), é o quão distante uma onda está do seu ciclo ou período de referência.

Um exemplo de defasamento de  $90^\circ$  pode ser visto na figura seguinte que ajuda a compreender melhor o parâmetro fase:



**Figura 22 – Exemplo de defasamento de ondas de  $90^\circ$**

Segundo Liu e Frigaard (2001) se considerarmos a presença de uma única sinusoidal monocromática, a elevação da superfície do mar em função do tempo e do espaço pode ser representada pela seguinte expressão matemática:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx + \varepsilon) = a \cos(\omega t - kx + \varepsilon) \quad \text{Eq. 8}$$

Na equação 6 a variável  $a$  representa a amplitude de onda ( $a = H/2$ ),  $\omega$  é a frequência angular ( $\omega = 2\pi/T$ ),  $k$  é o número de onda angular e corresponde a  $2\pi/L$ , e  $\varepsilon$  representa o ângulo de fase que permite ter em conta o fato de diferentes ondas não se encontrarem todas em fase, isto é, os seus máximos ocorrem em instantes distintos. A variável  $x$  representa a posição do ponto no qual se pretende o valor da elevação enquanto a variável  $t$  representa o instante em que pretendemos calcular. O número de onda  $k$  é uma medida cíclica do número de cristas ou cavas por cada  $2\pi$  unidades de distância. Chama-se de um ciclo de onda quando a onda percorre o seu comprimento de onda e repete-se, para uma onda regular os ciclos são de  $2\pi$  radianos.

Se considerarmos um ponto fixo ou seja para  $x = 0$ , como a posição inicial de propagação da onda, então podemos simplificar a equação 6:

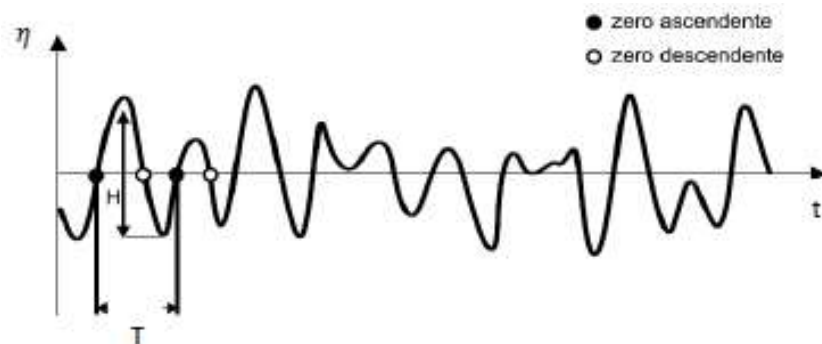
$$\eta(t) = a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad \text{Eq. 9}$$

## 4.2. Método do Zero Ascendente

Este método é uma das técnicas mais frequentemente utilizadas para definir uma onda individual a partir de uma série temporal de valores aleatórios da elevação do nível da superfície.

Primeiramente é imprescindível definir o nível médio da superfície do mar com base no registo de ondas, sendo este nível denominado como nível de repouso ou nível zero. Em seguida identifica-se os pontos do perfil da onda que cruzam a linha do nível médio. Se os pontos forem assinalados no sentido ascendente considera-se método do zero ascendente, se por outro lado os pontos forem assinalados no sentido descendente, designa-se de método do zero descendente.

Quando um destes pontos é assinalado em qualquer um dos sentidos, temos então o início de uma nova onda individual. Considera-se que uma onda chega ao fim e dá início a uma nova quando ela cruza o nível médio da superfície no mesmo sentido do primeiro. A Figura 23 representa a identificação de uma onda pelo método do zero ascendente bem como a altura de onda ( $H$ ) e o período ( $T$ ) da mesma.



**Figura 23 – Método de cruzamento com o nível médio da superfície segundo o zero ascendente (Straioto, 2006)**

A análise das séries temporais da elevação da superfície do mar segundo o método do zero ascendente fornece um cálculo direto de alturas de onda individuais e permite uma determinação de parâmetros como a altura significativa ( $H_s$ ) e altura máxima de onda ( $H_{máx}$ ), (Liu e Frigaard, 2001). O cálculo de ambos os parâmetros deriva do registo de ondas individuais que são definidas por dois sucessivos cruzamentos da elevação da superfície com o nível da água do mar em repouso, sendo a altura de cada onda medida pela distância vertical entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do nível da água entre esses dois zeros ascendentes.

Após a obtenção do registo, faz-se uma média de uma determinada fração das ondas mais altas do registo, para se obter estimativas do parâmetro desejado. Assim, para determinar a altura significativa segundo este método, faz-se uma média de 1/3 das alturas mais elevadas,  $H_{1/3}$ . Outro exemplo de um parâmetro usual é o  $H_{1/10}$ , que é calculado através da média das alturas de onda dos 10% das ondas mais altas registadas.

### **4.3. Método de Análise Espetral**

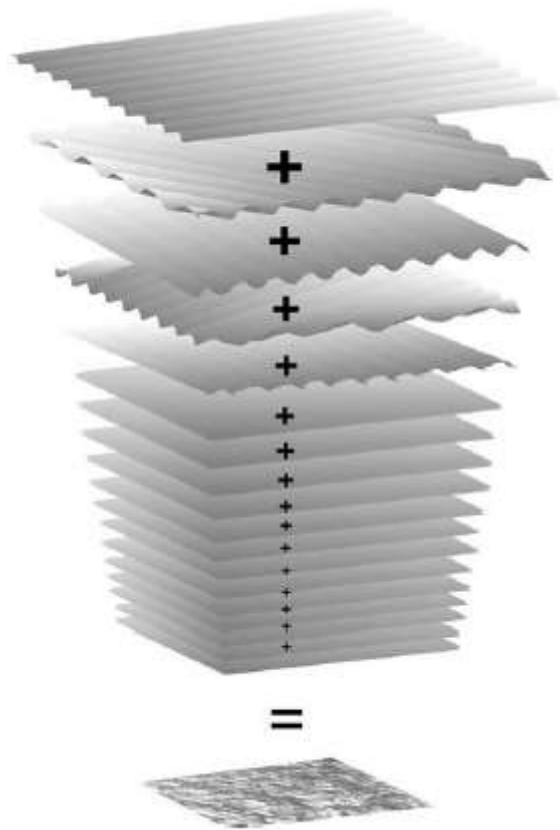
O método de análise espectral é uma técnica que trata da decomposição das séries temporais da elevação da superfície livre, em componentes individuais de diferentes frequências. Este método considera que as irregularidades da superfície podem ser interpretadas como o resultado da composição de uma gama de ondas regulares com diferentes amplitudes, frequências, direções. Grosso modo, o estado da superfície do mar pode ser visto como uma sobreposição de uma variedade de ondas sinusoidais, e que se propagam em diferentes direções e com diferentes amplitudes, fases e frequências.

Esta ideia fundamenta o conceito de espectro de energia das ondas. Entende-se por espectro de energia de ondas como a distribuição da energia ao longo da frequência. A análise espectral é importante para um projeto de estruturas marítimas. No dimensionamento de estruturas portuárias onde a força das ondas desempenha um papel importante, é necessário que a estrutura seja concebida de tal maneira que a frequência natural da bacia portuária se encontre consideravelmente distante da banda de

frequência onde a maior parte da energia das ondas se encontra concentrada, para que o fenômeno de ressonância e a sua resultante amplificação da força e deformação possa ser minimizado ou evitado.

O fenômeno de geração das ondas pelo vento e a sua transformação após propagação podem afetar a energia destas de modo a que se concentre à volta de um determinado valor da frequência. A classificação que se atribui ao espectro associado a estas considerações denomina-se de espectro de banda estreita. Por outras palavras, assume-se que este tipo de espectro contém uma faixa estreita de valores da frequência de onda e que a energia de onda provém de um número infinito de ondas sinusoidais com propagações independentes entre si.

O método de representação da superfície do mar encontra-se ilustrado na Figura 24 que demonstra a superfície decomposta num grande número de ondas sinusoidais sobrepostas. O exemplo é melhor compreendido partindo da suposição de que são representados todos os perfis de onda sinusoidal na superfície do oceano, num determinado instante. Grosso-modo é como se se tratasse de uma fotografia com uma determinada área do mar que se pretende analisar, e cujas componentes da onda são considerados como elementos independentes uns dos outros. A principal diferença entre cada perfil sinusoidal de onda, para além do comprimento de onda, é a direção de propagação da onda, que varia em cada um dos perfis que são considerados.



**Figura 24 – Superfície do oceano obtida pela sobreposição de diferentes ondas sinusoidais (Holthuijsen 2007)**

Assim, a análise espectral permite-nos caracterizar a superfície livre do mar através da realização de uma descrição da distribuição de energia de um certo estado de agitação pelos períodos e direções das diferentes ondas geradas. Assim sendo, a partir do espectro é possível estimar certos parâmetros que caracterizam o clima de agitação, tais como a altura de onda significativa, o período médio, o período de pico e a direção média associada a este último.

## 5. CASO DE ESTUDO

O presente caso de estudo é referente à baía da Praia da Vitória, que se localiza na costa leste da ilha Terceira, grupo central do arquipélago dos Açores, em Portugal (Figura 25 e Figura 26).



Figura 25 – Vista Satélite da Praia da Vitória (Google Earth 2017)



**Figura 26 – Localização no Mapa de Portugal da Praia da Vitória**

O porto da Praia da Vitória é protegido por dois quebra-mares que definem a baía com cerca de 1,1 km de largura e 2,4 km de comprimento. O primeiro, situado a norte, foi construído durante os anos 70 com um comprimento de 560 m sendo destinado a oferecer abrigo às instalações portuárias de apoio à base das Lajes. O segundo situa-se a sul e é o que servirá de modelo para os estudos, foi construído em meados dos anos 80, com cerca de 1,3 km de comprimento apresentando um traçado curvo em planta. No interior do porto existe ainda uma defesa frontal com cerca de 1 km de comprimento e um campo com cinco esporões de diferentes comprimentos (Figura 27). Pode encontrar-se ainda ao longo da baía várias praias entre as quais a Praia Grande. A norte da praia grande está localizada uma marina com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio.



**Figura 27 – Campo de Esporões**

No final do mês de dezembro de 2001 ocorreu uma tempestade que afetou o arquipélago dos Açores, algumas estruturas costeiras foram danificadas, como foi o caso do quebra-mar sul da Praia da Vitória. Esta infra-estrutura ficou fortemente danificada no molhe, no muro cortina e no terrapleno devido à ação do intenso temporal. Na sequência deste tipo de tempestades no dia 21 de março de 2012 foi criado o projeto HIDRALERTA, que tem como participantes o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a Universidade Nova de Lisboa e a Universidade dos Açores.

Os danos podem ser observados na Figura 28.



**Figura 28 – Quebra-Mar da Praia da Vitória após a tempestade**

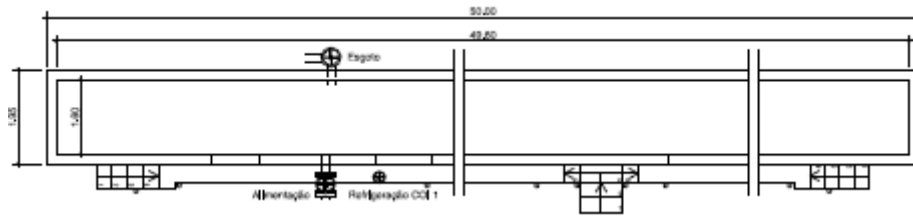
## 6. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO BIDIMENSIONAL

Os ensaios em modelo físico foram realizados nas instalações do pavilhão de Hidráulica Marítima no COI1 (Canal de Ondas Irregulares) situado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O COI1 foi o primeiro canal de ondas irregulares do LNEC e foi construído no ano de 1971. A sua construção permitiu o estudo da estabilidade e do galgamento de quebra-mares em modelo físico reduzido em 2D, com condições mais aproximadas às condições reais em relação às existentes naquela altura.

O COI1 é um canal com geometria retangular com 50 metros de comprimento, 1,95 metros de largura e 1.20 de altura. As dimensões interiores são de 49.60 metros de comprimento e 1.60 de largura (Figura 29 e Figura 30).



**Figura 29 – Vista Lateral do COI1**



**Figura 30 – Vista em planta do COI1**

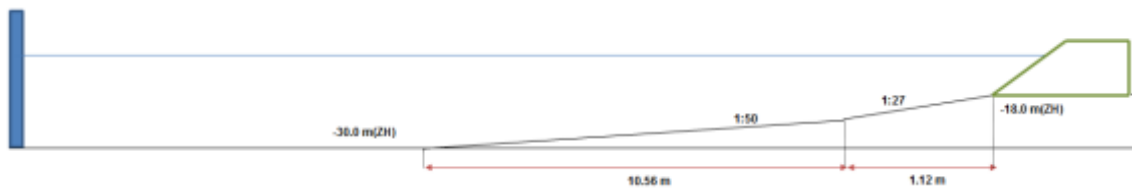
O COI1 permite a geração de ondas regulares ou periódicas e de ondas irregulares ou aleatórias através de um gerador hidráulico do tipo pistão que é controlado por uma placa de geração de sinais que se encontra ligada a um computador. Esta placa permite ainda utilizar o sistema de absorção ativa da reflexão AWASYS (*Active Wave Absorption System*) (Troch, 2005).

A principal vantagem em utilizar o sistema AWASYS é evitar que as ondas refletidas a partir de estruturas no canal sejam refletidas pela pá do batedor e se tornem ondas incidentes, ou seja, o sistema faz a compensação destas ondas. A absorção é muito importante para a geração de uma onda precisa, especialmente quando as estruturas em estudo são altamente refletivas. Este sistema requer o uso de duas sondas resistivas de medição de altura da superfície livre da água, que estão colocadas no canal, a uma distância de aproximadamente 3 metros do batedor. A posição das sondas depende da configuração que é adotada no dimensionamento de filtros digitais FIR (*Finite Impulse Response*).

Os filtros FIR são dimensionados consoante a configuração do sistema e condicionam o funcionamento do sistema de absorção. Devem ter em consideração o intervalo de frequências mínimas e máximas dos espectros de agitação marítima a reproduzir durante os ensaios e para os quais a amplitude de valores do desempenho do FIR é estável.

O modelo físico reduzido foi construído a uma escala de 1:48 e explorado a partir dos pressupostos presentes na lei de semelhança de Froude. Os fundos em frente ao local de implantação foram projetados e produzidos por intermédio de uma rampa com uma inclinação de 1:27 a partir do pé de talude do perfil à cota -18.0 m (ZH), até à cota -20.0

m (ZH), desenvolvendo-se a partir desse ponto uma inclinação de aproximadamente 1:50 até à cota de -30.0 m (ZH), como se encontra ilustrado nas seguintes figuras.



**Figura 31 – Implantação do modelo no canal**



**Figura 32 – Implantação do Perfil no modelo físico reduzido**

O manto resistente do quebra-mar é composto por 350 tetrápodos (cor vermelha, cinza e azul) de 300 kN cada, enquanto o pé do talude é composto por 175 blocos de enrocamento de 60 a 90 kN de cor branca e 1345 de enrocamento de 10 a 40 kN.

A diferenciação nas cores dos elementos do manto é utilizada para uma melhor visualização do nível de maré bem como o nível de onda incidente.

## 6.1. Agitação Incidente e Níveis de Maré

A agitação incidente fornecida segue um espectro de distribuição de ondas irregulares com uma configuração espectral empírica de JONSWAP.

O espectro JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) surge a partir do estudo de dados de onda registados no Mar do Norte e é uma relação empírica que define a distribuição de energia com frequência dentro do oceano. A função definidora do espectro definidora é dada por:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[ \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2} \right]} \quad \text{Eq. 10}$$

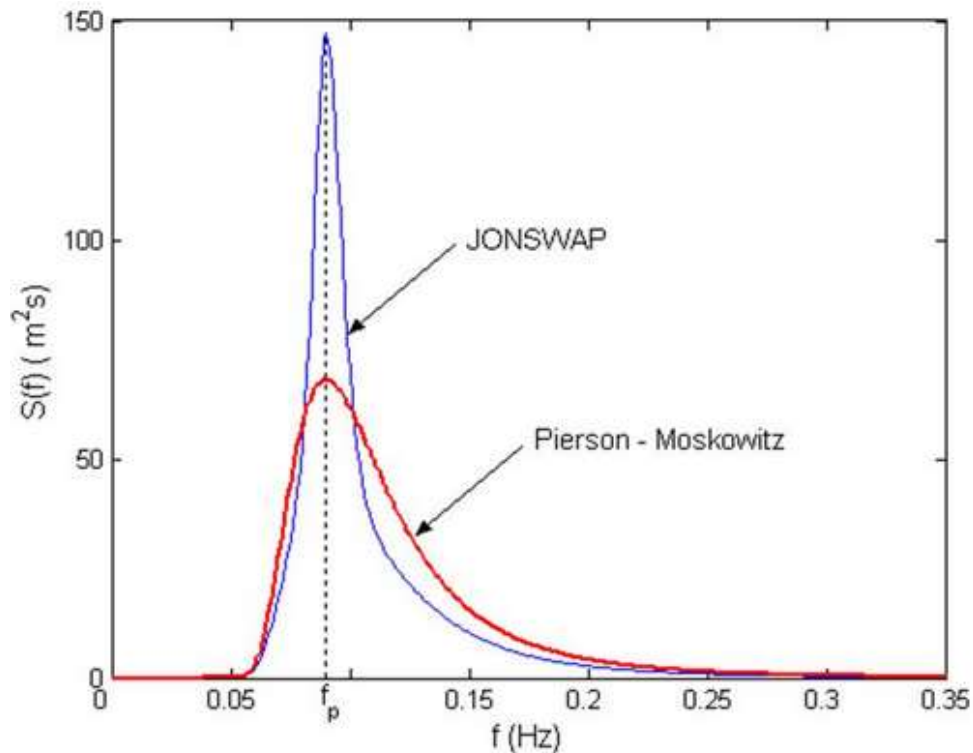
Onde:

$\gamma$  – Parâmetro de Pico;

$\alpha = 0.0081$ ;

$\sigma^2$  – Parâmetro de forma.

O parâmetro  $\omega_0$  é dado pelo comprimento da zona ao longo da qual o vento se faz sentir na zona de geração, denominado por *fetch*. Se o valor do parâmetro de pico for 1 o espectro de JONSWAP iguala-se ao espectro de Pierson-Moskowitz, fazendo com que este seja um caso particular do espectro de JONSWAP. A diferença entre estes dois espectros encontra-se visível na Figura 33



**Figura 33 – Diferença entre o Espectro JONSWAP e Pierson-Moskowitz**

Os níveis de maré ensaiados foram os de Baixa-mar (BM), que correspondem a 0.0 m (ZH), e os de Preia-mar (PM), que correspondem a +2.0 m (ZH). Os períodos de pico ( $T_p$ ) ensaiados foram os correspondentes a 10s, 14s e 18s para diferentes níveis de maré. Na Tabela 2 encontram-se enunciadas as condições de agitação incidente requeridas para a realização dos ensaios ( $H_s$ , altura de onda significativa,  $T_p$ , período de pico do espectro de agitação e o nível de maré, BM ou PM).

**Tabela 2 – Agitação Incidente e níveis de maré dos ensaios**

Hs (m)	Nível de BM			Nível de PM		
	Tp = 10s	Tp = 14 s	Tp = 18 s	Tp = 10s	Tp = 14 s	Tp = 18 s
5.5	X	X	X	X	X	X
6.5	X	X	X	X	X	X
7	X					
7.5	X	X		X	X	
8		X		X	X	
8.5		X			X	
9					X	

De modo a que os resultados obtidos tivessem uma boa precisão definiu-se que os ensaios deveriam ser compostos no mínimo por 1000 ondas. A duração dos ensaios até ser atingida a milésima onda é apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Duração de cada ensaio**

Tp(s)		Duração do ensaio no modelo (Escala 1/48)		
Protótipo	Modelo	Tempo de ensaio 1000 ondas (s)	Tempo de ensaio 1000 ondas (min)	Tempo Considerado para o sinal de geração (min)
10	1.44	1443.38	24	25
14	2.02	2020.73	34	35
18	2.6	2598.08	43	44
20	2.89	2886.75	48	49

## 6.2. Equipamento de medição

Para a realização dos ensaios foram disponibilizadas pelo LNEC nove sondas resistivas para a medição da elevação da superfície livre, e a sua disposição ao longo do canal encontra-se esquematizada na Figura 34, e na Figura 35.

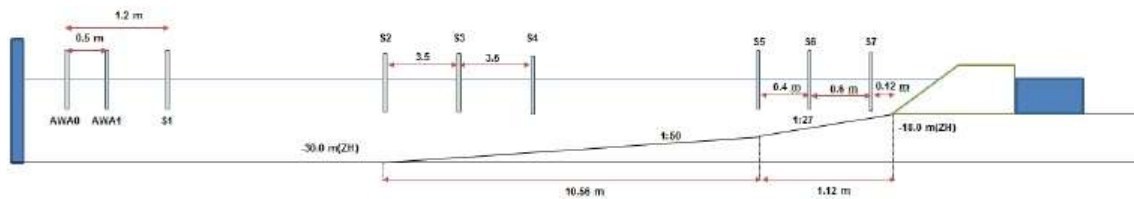


Figura 34 – Disposição das sondas ao longo do canal



Figura 35 – Fotografia elucidativa da disposição das sondas

As sondas AWA0 e AWA1 estão associadas ao controlo do sistema de absorção e distam 50 cm entre si (Figura 36).



**Figura 36 – Sondas AWA0 e AWA1**

A Sonda S1 encontra-se colocada junto ao batedor (Figura 37) a uma distância de 10 cm da sonda AWA1 e serve para medir a elevação da superfície livre junto ao batedor, enquanto as sondas de S2 a S4 permitem-nos saber a elevação a meio do canal. A sonda S2 está colocada no início da rampa, com o declive de 1:50 e as sondas S3 e S4 encontram-se espaçadas 3.5 m entre si.



**Figura 37 – Sonda S1**

A sonda S5 está colocada no início da rampa com um declive de 1:27 e a uma distância de 40 cm da sonda S6, sendo que a S7 se encontra situada a 1.0m desta última (Figura 38). As sondas S5 a S7 servem para medir a elevação da superfície livre junto ao pé do talude e determinar os parâmetros de agitação marítima, nomeadamente, alturas significativas e períodos de pico.



**Figura 38 – Sondas S5, S6 e S7**

### **6.3. Calibração das Sondas e Aquisição de Dados**

As sondas resistivas (Figura 39) funcionam através da variação da sua resistência elétrica em função da profundidade imersa de cada sonda. O método baseia-se na medição da diferença de tensão entre os fios condutores, que por sua vez é diretamente proporcional à profundidade imersa da sonda.

A calibração das sondas consiste na leitura da tensão das mesmas em duas posições de medições diferentes, ou seja, duas profundidades diferentes, permitindo assim chegar a uma constante de sonda ( $K_s$ ) que é obtida a partir do quociente entre a diferença de cotas (medida em centímetros) e a diferença de tensões, lidas em centivolts. A constante de sonda pode variar com a temperatura ou com impurezas presentes na água, sendo por

isso necessário efetuar a leitura das mesmas diariamente ou até duas vezes por dia no caso de existir uma variação da temperatura ambiente que se justifique. No caso de existirem variações de constantes de sonda consideráveis pode ser necessário substituir a água no canal, limpar as sondas com ácido acético ou em último caso substituir as mesmas.



**Figura 39 – Sonda Resistiva**

Para converter o sinal analógico em digital, é necessária uma ligação de todas as sondas a uma caixa de alimentação (Figura 40) e que por sua vez se encontre ligada a um equipamento de aquisição de dados e conversão do sinal como é o caso do Spider 8 (Figura 41).



**Figura 40 – Caixa de alimentação das sondas**



**Figura 41 – Equipamento de aquisição Spider 8**

Este sistema utiliza o *software* Catman Easy (Figura 42) para a configuração dos canais de aquisição de dados e aquisição dos dados, sendo possível acompanhar a evolução dos dados em tempo real.

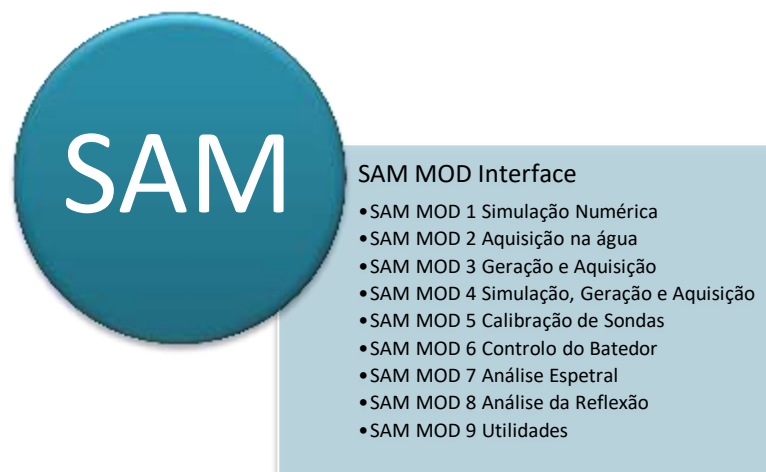


**Figura 42 – *Software* de registo de voltagem Catman Easy**

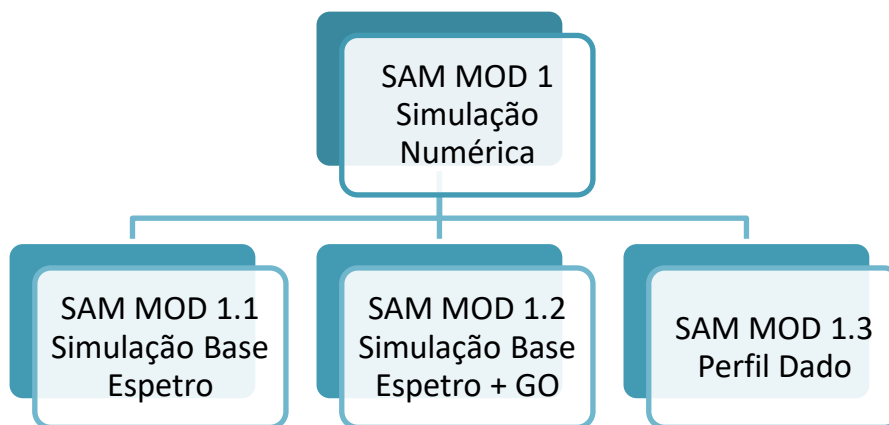
## 6.4. Ferramenta SAM (Simulação de Agitação Marítima)

Existem vários métodos para gerar agitação em canais ou tanques de ondas irregulares: uns que partem de espectros, outros de registos de agitação marítima previamente especificados.

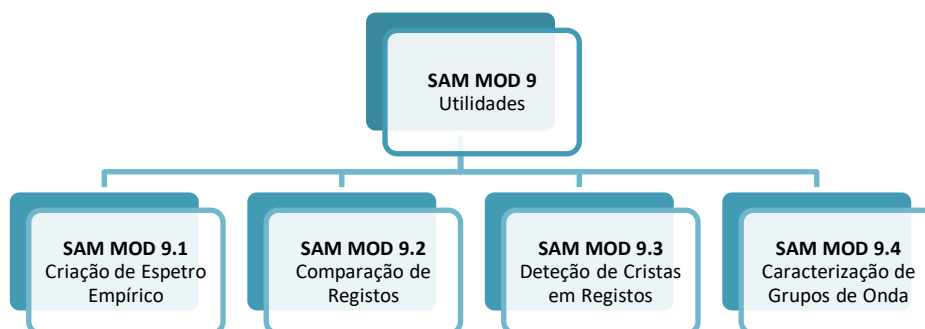
O pacote SAM é constituído por nove módulos principais (SAM MOD 1 a SAM MOD 9), interligados, respeitantes às diversas fases seguidas num ensaio típico. A estrutura do pacote de *software* encontra-se elucidada na Figura 43. Por sua vez o SAM MOD 1 (simulação numérica) encontra-se subdividido em três sub-módulos como esquematizado na Figura 44. O SAM MOD 9 (utilidades) tem quatro módulos e encontra-se esquematizado na Figura 45.



**Figura 43 – Estrutura do pacote de *software* SAM (Simulação da Agitação Marítima)**



**Figura 44 – Estrutura do módulo SAM MOD 1 (Simulação Numérica)**



**Figura 45 – Estrutura do SAM MOD 9 (Utilidades)**

Os módulos utilizados desta ferramenta foram o módulo 1 (simulação numérica) para geração do FIR (Figura 46), que nomeadamente são os filtros para a utilização do sistema de absorção de onda, e geração individual de cada ficheiro do tipo PAD, (Figura 47). Este é um ficheiro de controlo de *software* para automatização de sistemas, tendo neste caso sido utilizado para automatizar os deslocamentos do batedor.

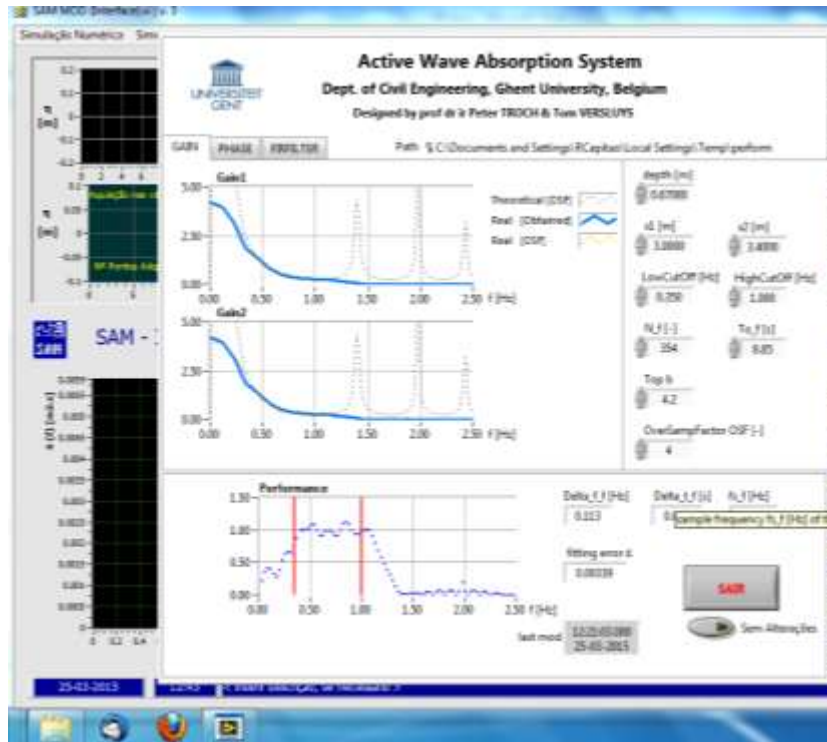


Figura 46 – Geração do FIR (MOD 1)

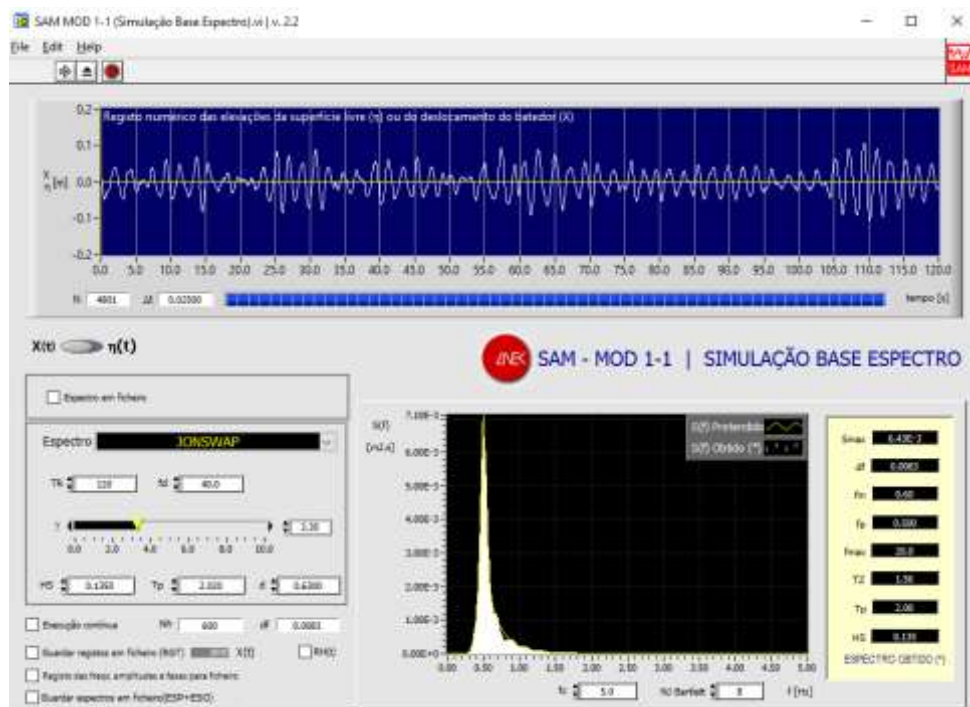
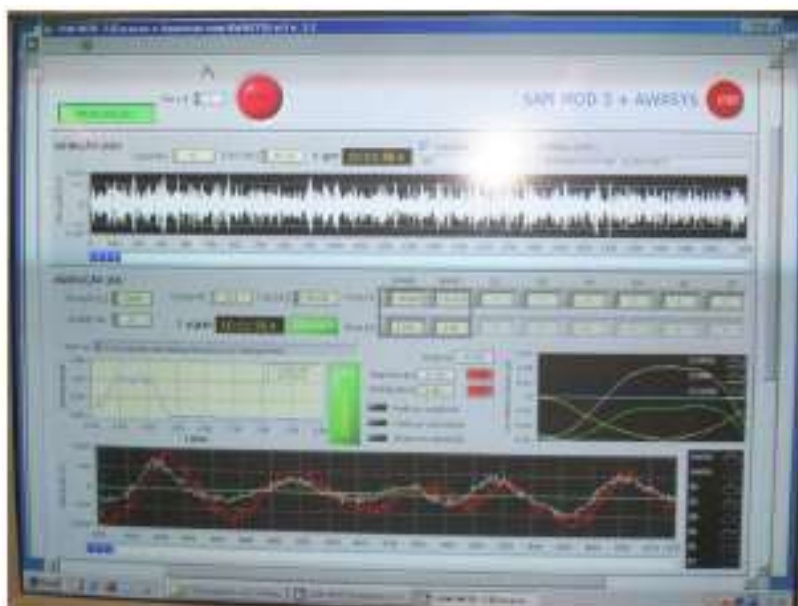


Figura 47 – Exemplo da interface com o utilizador numa simulação com base no espectro JONSWAP

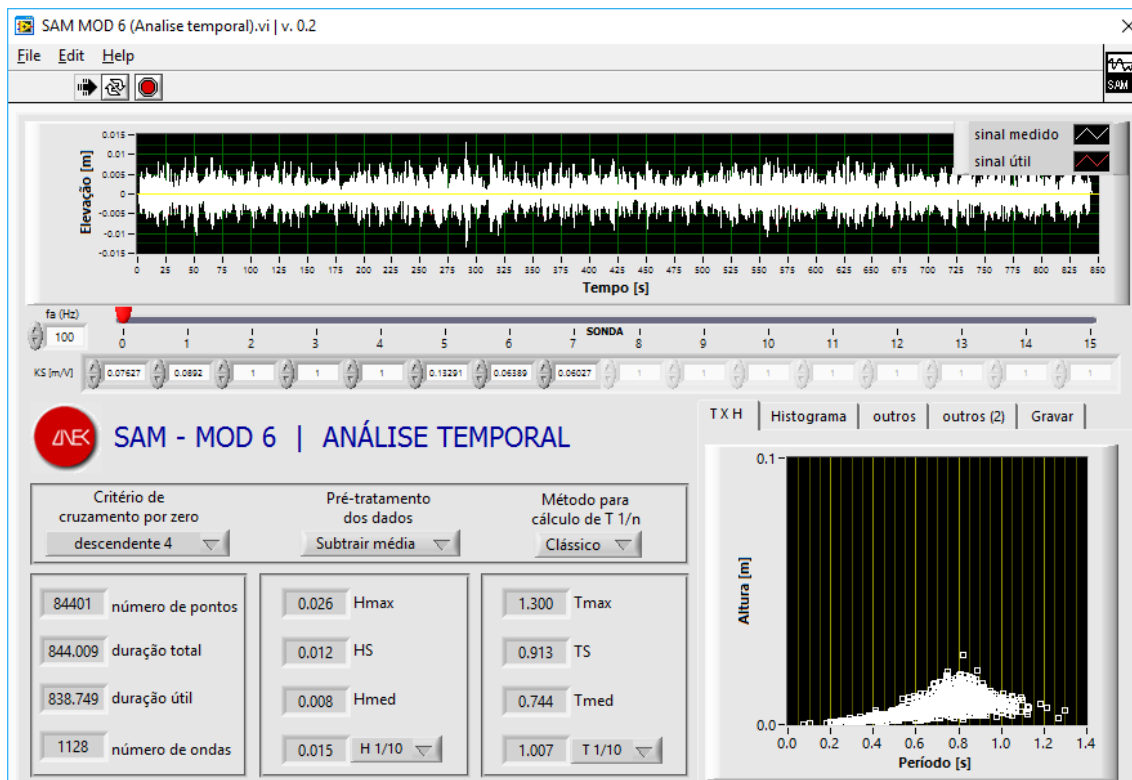
Os dados inseridos no programa para a geração dos PAD foram o  $H_s$ , o  $T_p$ , o TR (tempo de registo) e o  $d$  (profundidade à saída do gerador), com o objetivo do espetro obtido ter as grandezas  $H_s$  e  $T_p$  com valores iguais ou muito próximos aos valores digitados. Foram gerados PAD para todos os ensaios presentes no plano de ensaios. Após a geração dos PAD foram feitos ensaios de calibração com o intuito de verificar se a simulação coincidia com o registo obtido pelos ensaios. Por vezes foi necessário aumentar a  $H_s$  simulada para obter o registo proposto no plano de ensaios, normalmente este fato é devido a limitações no bater de geração de ondas. Para a geração e aquisição do sinal foi utilizado o módulo 3 (geração e aquisição) sendo o ponto inicial de cada ensaio.



**Figura 48 – Interface com o utilizador numa aquisição de sinal proveniente de sondas no programa SAM**

Posteriormente à realização dos ensaios finais procedeu-se a dois tipos de análise dos registos, a análise temporal e a análise espectral recorrendo ao módulo 6 e 7 do SAM. Em seguida a título de exemplo de funcionamento do SAM é apresentada uma interface com o utilizador de uma análise temporal (Figura 49) que contém a informação retirada do SAM MOD 6 após serem inseridas as constantes das sondas (medidas diariamente). Primeiramente observa-se o sinal medido em elevações do nível médio da água ao

longo do tempo. Em baixo pode-se observar valores obtidos como o número de pontos total do sinal e o número de ondas (o critério utilizado para contabilizar uma onda foi o cruzamento de 4 zeros no sentido descendente), bem como os valores de  $H_{\text{máx}}$ ,  $H_s$ ,  $H_{\text{méd}}$  e o  $T_{\text{máx}}$ ,  $T_s$ ,  $T_{\text{méd}}$  da série temporal analisada. No canto inferior direito tem-se um gráfico que contém pontos de altura em função do período em que o local em que se encontram mais pontos com a mesma altura corresponde à altura média o mesmo no caso do período médio.



**Figura 49 – Interface com o utilizador do SAM MOD 6 (Análise Temporal)**

Na Figura 50 apresenta-se um exemplo de visualização dos dados extraídos do SAM utilizando uma folha de cálculo. Neste caso os dados apresentados estão divididos por valores obtidos para cada sonda.

Arquivo	Sonda	N.ptos	t.total	t.util	N.ondas	Hmax	Hs	Hmedio	n	H1/n	Tmax	Ts	Tmedio	H(Tmax)	T(Hmax)
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	114000	2280	2057.6	1277	0.24848	0.1316	0.083591	20	0.17608	4.32	2.094	1.6113	0.14643	2.06
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	2	114000	2280	2057.6	1229	0.24817	0.12706	0.079917	20	0.18243	4.02	2.2395	1.6742	0.074323	2.44
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	3	114000	2280	2057.8	1238	0.2549	0.1364	0.086032	20	0.19466	3.82	2.2334	1.6622	0.11424	1.96
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	4	114000	2280	2059	1191	0.27418	0.13551	0.090221	20	0.18178	3.72	2.1184	1.7288	0.044889	1.78

Figura 50 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 6

No que diz respeito ao módulo 7 (Análise Espetral) os dados inseridos no programa foram igualmente as constantes de sonda (medidas diariamente) e a informação obtida pode ser visualizada numa interface com o utilizador na Figura 51 em que na parte superior encontramos o sinal medido em elevações do nível médio da água ao longo do tempo e em baixo o espetro obtido.

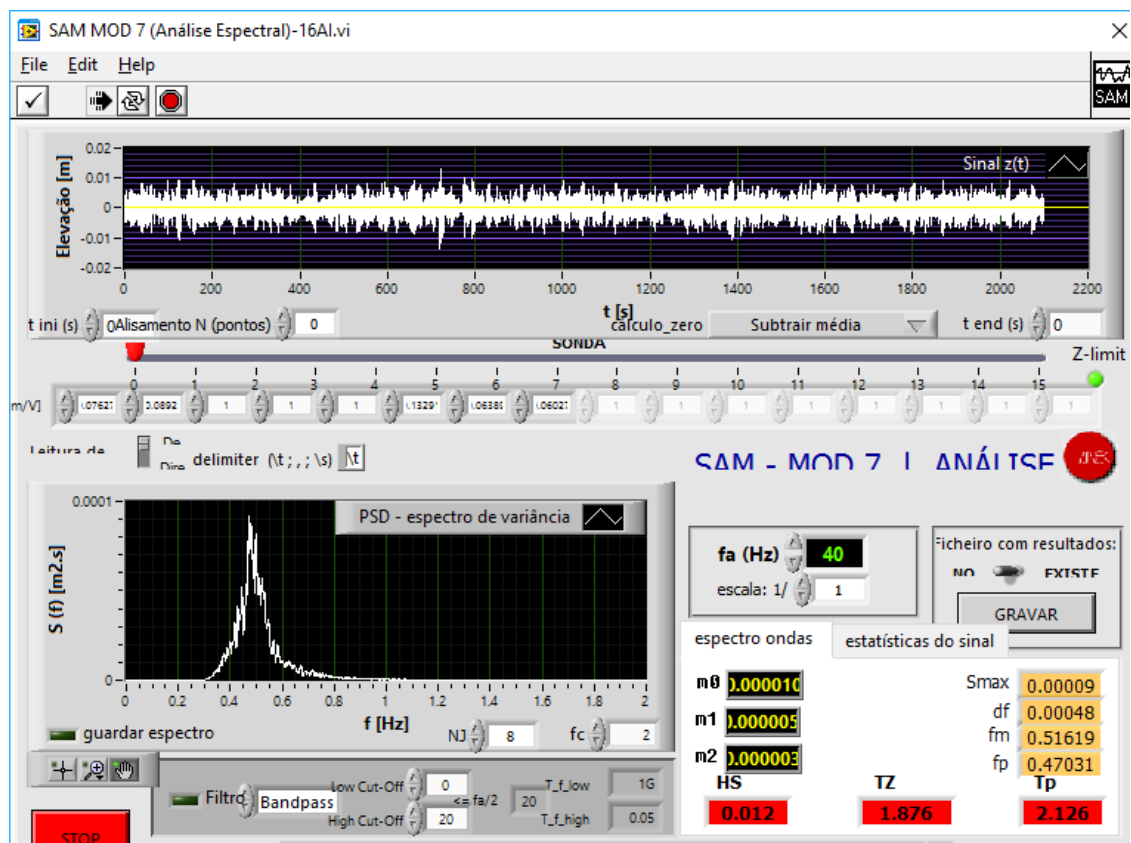


Figura 51 – Interface com o utilizador do SAM MOD 7 (Análise Espetral)

Os dados que podem ser retirados desta análise encontram-se elucidados na Figura 52 e na Figura 53 e são gravados em ficheiros do tipo .ASC que podem ser visualizados com recurso à ferramenta de cálculo Microsoft Excell.

Este módulo dá-nos valores também divididos por sondas como o número de pontos, altura significativa, período de pico, dá-nos ainda alguns valores de frequências bem como valores estatísticos como a moda, mediana, desvio padrão e curtose, que seriam úteis para uma posterior análise estatística.

Ficheiro	Escala 1/	Sonda	N.ptos	t.total (s)	t.util (s)	ks (m/V)	HS (m)	TZ (s)	TP (s)	fm (Hz)	fp (Hz)	Smax (m2/s)
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	1	113990	2279.9	2057.9	0.0852	0.12515	1.5258	1.8863	0.60272	0.53014	0.0082472
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	2	113990	2279.9	2058.2	0.15714	0.099127	1.5067	257.27	0.53285	0.0038869	0.018417
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	3	113990	2279.9	2057.2	0.06591	0.12967	1.6095	1.9743	0.57911	0.50651	0.011376
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	4	113990	2279.9	2057.5	0.06566	0.13318	1.5932	2.0783	0.58119	0.48117	0.011978
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	5	113990	2279.9	2057.9	0.13043	0.13037	1.5423	2.2104	0.58093	0.4524	0.0091142
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	6	113990	2279.9	2057.9	0.06319	0.14401	1.3565	2.062	0.57622	0.48496	0.012336
d063_Tp202_Hs153(65).ASC	1	7	113990	2279.9	2057.9	0.06044	0.12839	1.4953	1.8862	0.59764	0.53016	0.0082422

**Figura 52 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 7**

média	moda	dp	mediana	npontos	variancia	assimetria	curtose	maximo	t_max	minimo	t_min
-9.6644E-07	-0.0037444	0.031271	-0.00068234	102900	0.00097785	0.18904	3.0829	0.14821	703.44	-0.10296	757.58
7.1682E-06	-0.0015316	0.030918	-0.000046958	102910	0.0009559	0.0011931	2.8481	0.11203	578.26	-0.10847	1826.1
-0.000013635	-0.00029888	0.0324	-0.0015483	102860	0.0010498	0.29786	3.0174	0.14775	716.36	-0.10107	787.22
6.8712E-06	-0.01206	0.033276	-0.0024895	102880	0.0011073	0.43074	3.2459	0.17119	643.18	-0.096331	723.3
5.1274E-06	-0.014268	0.032573	-0.0027989	102900	0.001061	0.47235	3.6123	0.1678	645.24	-0.11017	1831.1
6.9583E-07	-0.0036301	0.035982	-0.0017205	102900	0.0012947	0.37173	3.314	0.36124	1645.4	-0.11572	1689.8
3.5849E-07	-0.0058924	0.03208	-0.0027648	102890	0.0010291	0.49009	3.3014	0.18629	645.32	-0.082497	1832.8

**Figura 53 – Visualização dos dados retirados do SAM MOD 7**

## 6.5. Metodologia dos Ensaios

A metodologia para a realização dos ensaios, é composta por duas fases, a primeira corresponde à calibração da agitação do modelo e a segunda à execução, registo e posterior análise dos ensaios realizados.

Para a calibração do modelo, utilizaram-se as medições obtidas através da sonda S1, para controlar a agitação que está a ser gerada junto ao batedor, e as sondas S5, S6 e S7, para controlar as condições de agitação junto à obra. Os valores de Hs adotados para a realização dos ensaios correspondem à média dos valores registadas nas sondas junto à obra.

A geração de espetros é feita recorrendo ao programa SAM como foi descrito no capítulo anterior com mais detalhe. Todos os espetros gerados foram testados antes da realização dos ensaios para todas as condições de ensaios apresentados na Tabela 2 e com o tempo de ensaios apresentados na Tabela 3.

A segunda fase ou fase de ensaios é composta pelo(a):

- Calibração diária das sondas resistivas;
- Registo fotográfico da obra antes de cada ensaio;
- Geração de ondas irregulares conforme o plano de ensaios;
- Aquisição dos dados registados por cada sonda, assim como contabilização de todos as quedas/movimentos dos blocos do manto hidráulico;
- Registo fotográfico da obra depois de cada ensaio;
- Reconstrução manual do modelo após o fim dos ensaios de cada Tp tanto para o nível de maré BM como PM
- Tratamento dos dados registados durante os ensaios;
- Análise dos dados.

## 7. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 7.1. Análise de Agitação

#### 7.1.1. Análise Temporal

São vários os parâmetros que se podem obter de um registo temporal da elevação da superfície livre: altura e período significativos da onda,  $H_s$  e  $T_s$ ; altura e período médios,  $H_m$  e  $T_m$ ; altura e período máximos,  $H_{máx}$  e  $T_{máx}$ ; altura correspondente ao período máximo  $H(T_{máx})$  e período correspondente à altura máxima  $T(H_{máx})$ . Estes parâmetros são dependentes do modo como as ondas individuais são identificadas. No presente caso, o critério utilizado foi o método do zero-ascendente (*zero-upcrossing*). Para determinação destes parâmetros recorreu-se à utilização do *software* SAM.

Para validação das  $H_s$  pretendidas foi feita uma média dos valores de  $H_s$  obtidos, referentes às últimas três sondas, ou seja, as mais próximas do local da obra. Deste modo conseguimos garantir que a  $H_s$  incidente no local da obra aproxima-se do  $H_s$  pretendido.

#### **Período $T_p = 10$ s e nível de maré BM**

Na Tabela 4 e na Figura 54, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré BM, ao longo do canal, para todas as alturas significativas de onda testadas.

**Tabela 4 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré BM**

Hs [m]		5.50		6.50		7.00		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	5.61	10.95	6.60	11.00	7.10	10.89	7.64	11.02
	2	6.23	11.28	7.25	11.32	7.73	11.28	8.37	11.54
1/2 Canal	3	5.68	11.41	6.60	11.41	6.98	11.45	7.62	11.57
	4	5.88	11.41	6.87	11.34	7.25	11.51	7.81	11.66
Junto á obra	5	5.87	11.37	6.94	11.46	7.16	11.48	7.77	11.55
	6	5.33	11.06	6.28	11.42	6.55	11.24	7.07	11.47
	7	5.89	11.87	6.84	11.91	7.18	11.93	7.80	12.10

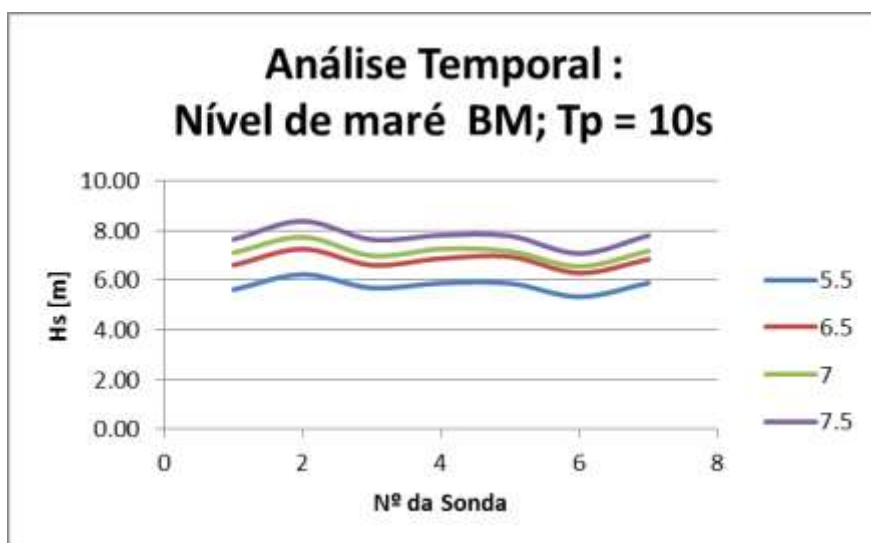


Figura 54 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré BM

### Período $T_p = 10$ s e nível de maré PM

Na Tabela 5 e na Figura 55, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré PM, ao longo do canal, para todas as alturas significativas de onda testadas.

Tabela 5 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré PM

Hs [m]		5.50		6.50		7.50		8.00	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	6.42	11.00	7.40	10.97	8.70	10.95	9.25	11.03
1/2 Canal	2	7.05	11.45	7.94	11.28	9.28	11.33	10.03	11.48
	3	5.61	11.73	6.45	11.25	7.55	11.49	7.97	11.51
	4	5.65	11.76	6.47	11.27	7.38	11.50	7.98	11.54
Junto á obra	5	5.88	11.55	6.71	11.27	7.62	11.41	8.20	11.52
	6	5.34	11.47	5.97	11.15	6.82	11.23	7.26	11.44
	7	5.70	12.00	6.57	11.73	7.58	12.02	8.14	11.96

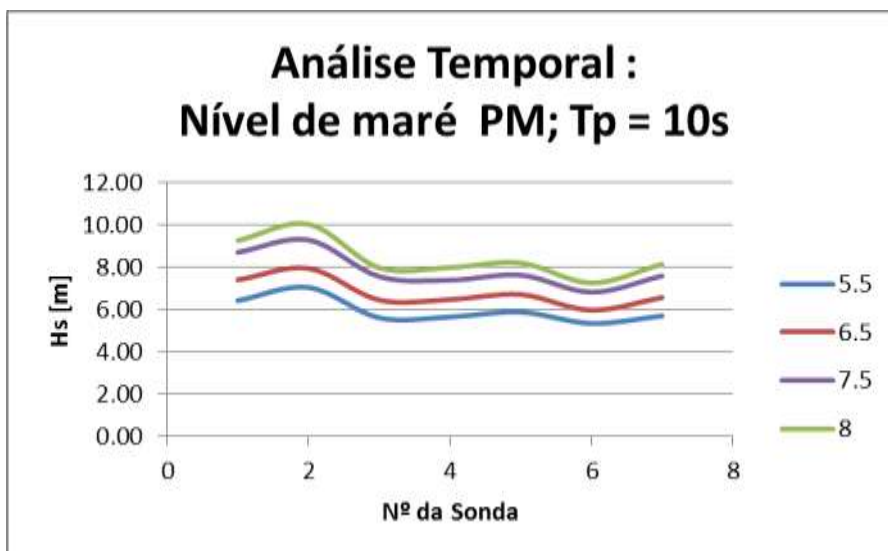


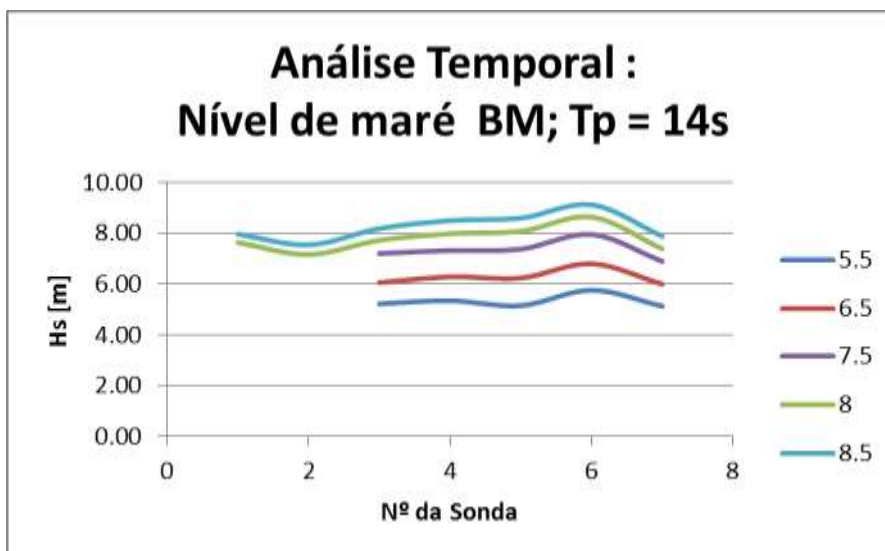
Figura 55 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré PM

### Período $T_p=14$ s e nível de maré de BM

Na Tabela 6 e na Figura 56, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré BM, ao longo do canal, para todas as alturas significativas de onda testadas.

Tabela 6 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré BM

Hs [m]		5.50		6.50		7.50		8.00		8.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	5.03	14.48	5.89	14.57	6.93	14.61	7.63	14.85	7.97	14.87
	2							7.16	15.19	7.54	15.29
1/2 Canal	3	5.22	14.83	6.06	15.15	7.20	15.28	7.72	15.46	8.18	15.33
	4	5.34	15.23	6.29	15.20	7.32	15.28	7.98	15.58	8.50	15.63
Junto á obra	5	5.15	15.78	6.24	15.83	7.37	15.86	8.08	16.17	8.60	16.24
	6	5.76	15.47	6.80	15.58	7.95	15.95	8.64	16.11	9.12	15.86
	7	5.13	14.70	6.00	14.63	6.90	14.89	7.39	15.11	7.88	15.14



**Figura 56 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 14 s$  e nível de maré BM**

Constatou-se que os registos obtidos com a sonda 2, para os três primeiros ensaios, não apresentavam valores coerentes devido a problemas com a sonda colocada neste ponto, não tendo, por isso, sido apresentados esses resultados. Para os ensaios seguintes a sonda foi substituída e os ensaios decorreram com normalidade.

### **Período $T_p = 14s$ e nível de maré PM**

Na Tabela 7, Tabela 8 e na Figura 57, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré PM, ao longo do canal, para todas as alturas significativas de onda testadas.

**Tabela 7 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré PM (Hs = 5.5 a 7.5)**

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	4.85	15.21	5.69	15.19	6.48	15.22
1/2 Canal	2	5.42	15.57	6.23	15.63	7.12	15.59
	3	5.21	15.40	6.27	15.62	6.93	15.68
	4	5.65	15.82	6.56	15.81	7.36	15.71
Junto á obra	5	5.57	16.32	6.57	16.59	7.52	16.64
	6	6.18	16.00	7.31	16.20	8.28	16.29
	7	5.17	14.85	5.98	14.92	6.69	14.87

**Tabela 8 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré PM (Hs = 8.0 a 9.0)**

Hs [m]		8.00		8.50		9.00	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	6.86	15.34	7.47	15.32	8.13	15.42
1/2 Canal	2	7.65	15.61	8.22	15.84	8.89	15.91
	3	7.70	15.77	8.12	15.68	8.90	15.91
	4	7.88	15.88	8.42	15.84	9.11	15.92
Junto á obra	5	8.24	16.64	8.89	16.75	9.54	16.86
	6	9.10	16.18	9.65	16.11	10.21	16.29
	7	7.26	15.09	7.67	15.33	8.41	15.37

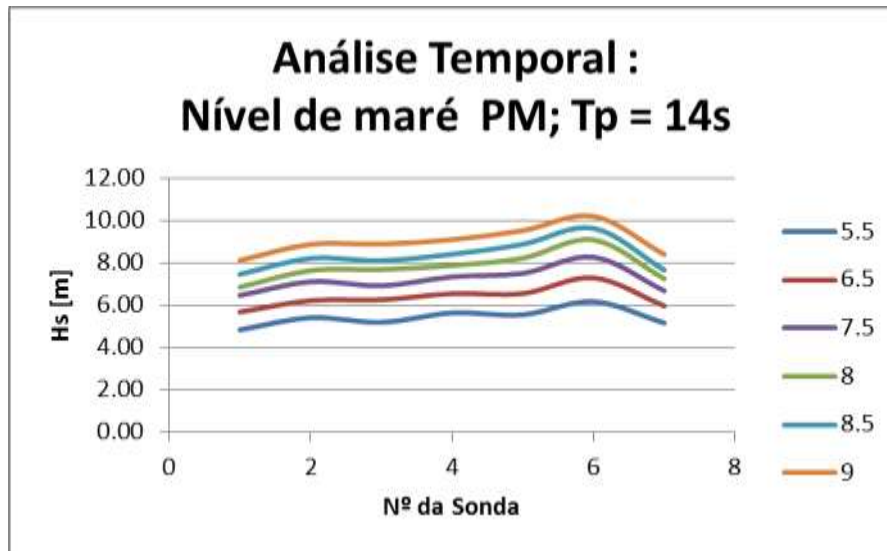


Figura 57 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré PM

#### Período $T_p = 18$ s e nível de maré BM

Para este período e nível de maré, tal como ocorreu para o nível de PM, devido a limitações relacionadas com o batedor e devido à existência de rebentação logo à saída do batedor, apenas foi possível a realização de dois ensaios, correspondentes às alturas significativas de onda, Hs, 5.50 e 6.50m.

Na Tabela 9 e na Figura 58, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré BM, ao longo do canal, para todas as alturas significativas de onda testadas.

Tabela 9 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré BM

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	5.29	19.09	6.02	19.09
1/2 Canal	2	5.24	19.15	5.76	19.16
	3	5.22	19.11	5.86	19.44
	4	5.24	19.94	5.98	20.08
Junto á obra	5	6.60	19.50	7.39	19.61
	6	5.75	18.79	6.41	18.73
	7	4.13	16.79	4.76	17.33

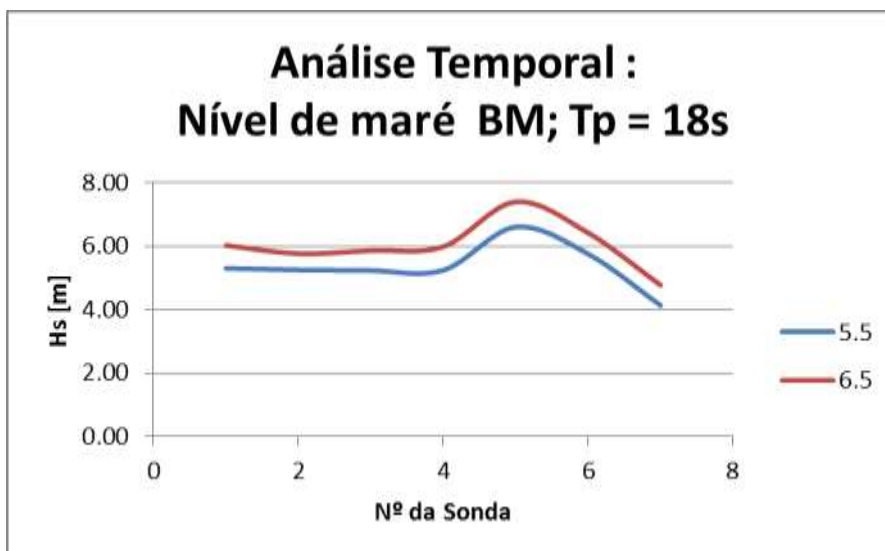


Figura 58 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré BM

### Período $T_p = 18$ s e nível de maré PM

Na Tabela 10 e na Figura 59, apresentam-se os valores obtidos para as duas alturas de onda testadas para BM, pelo programa SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré PM, ao longo do canal.

Tabela 10 – Resultados obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré PM

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Ts [s]	Hs [m]	Ts [s]
Batedor	1	5.14	19.15	5.94	19.24
1/2 Canal	2	5.09	19.02	5.82	18.88
	3	5.07	19.39	5.81	19.25
	4	5.34	20.09	6.21	19.97
Junto á obra	5	6.44	19.36	7.46	19.33
	6	5.66	18.74	6.52	18.61
	7	4.02	16.91	4.74	17.09

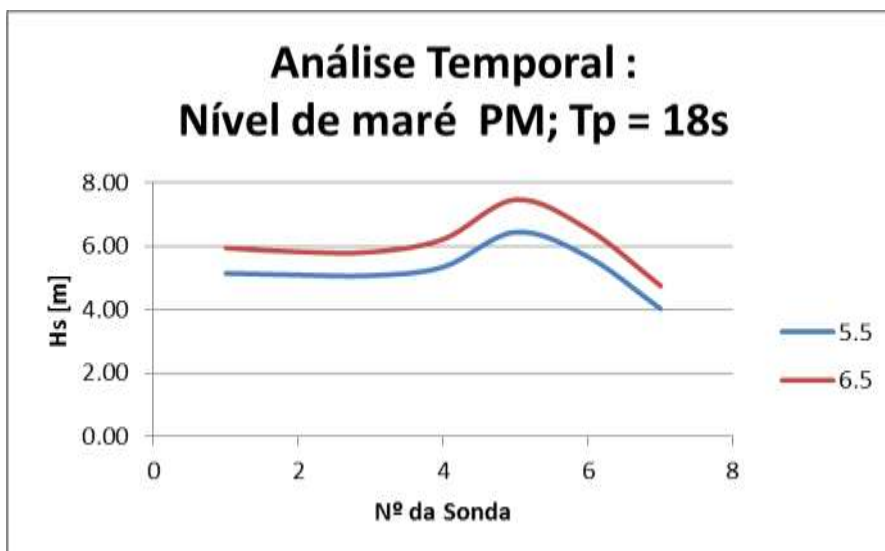


Figura 59 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré PM

### 7.1.2. Análise Espetral

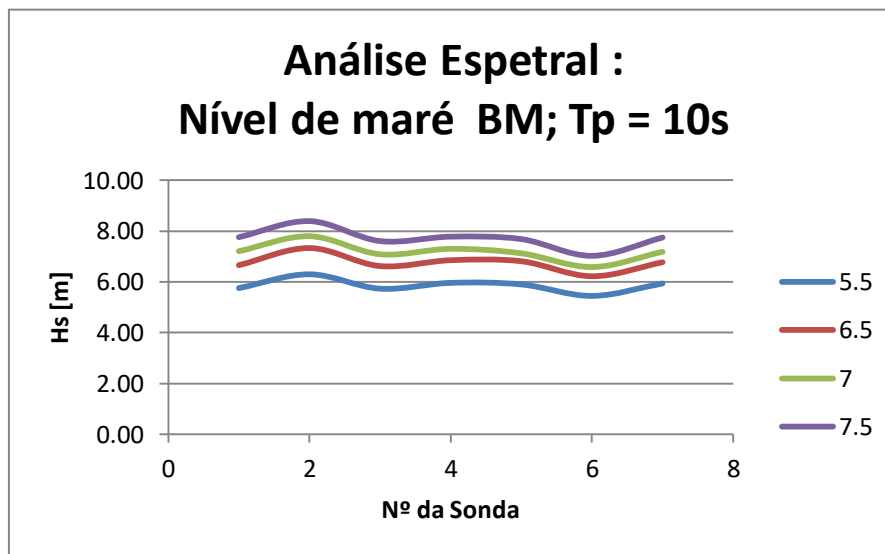
Partindo dos registos temporais da elevação da superfície livre, realizou-se uma análise espectral dos mesmos, a partir da qual é possível obter a altura significativa de onda  $H_s$ , assim como o período de pico da onda,  $T_p$ . Para a determinação destes parâmetros utilizou-se o *software* SAM.

#### Período $T_p = 10$ s e nível de maré de BM

Na Tabela 11 e na Figura 60, apresentam-se os valores obtidos pelo pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de BM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 11 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de BM**

Hs [m]		5.50		6.50		7.00		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	5.75	10.26	6.66	9.97	7.21	9.92	7.76	9.96
1/2 Canal	2	6.30	10.12	7.33	10.08	7.80	9.92	8.39	10.11
	3	5.73	10.38	6.62	9.60	7.09	10.57	7.61	10.40
	4	5.96	10.12	6.85	9.80	7.30	9.87	7.78	9.81
Junto á obra	5	5.90	10.12	6.81	10.06	7.13	10.13	7.69	9.83
	6	5.45	10.13	6.22	9.80	6.58	9.87	7.03	9.83
	7	5.94	10.12	6.77	10.07	7.19	10.13	7.75	9.82



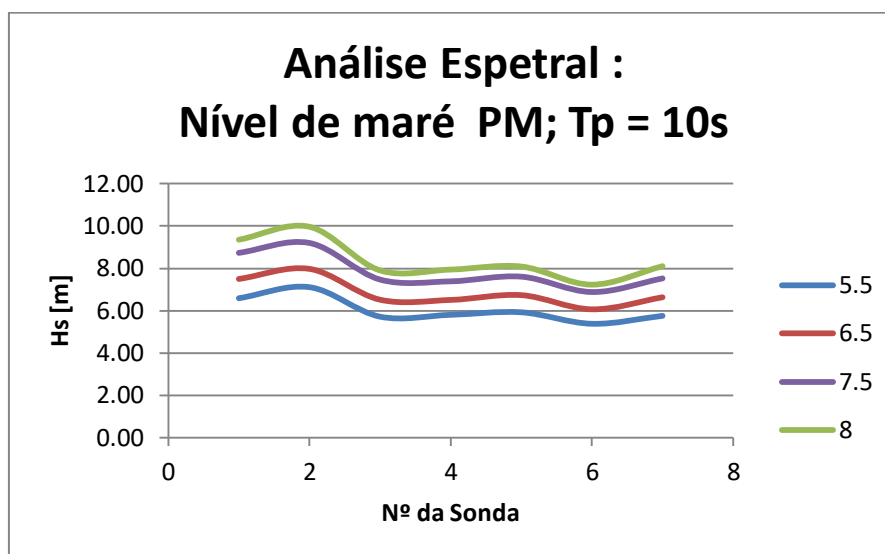
**Figura 60 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de BM**

### Período $T_p = 10$ s e nível de maré de PM

Na Tabela 12 e na Figura 61, apresentam-se os valores obtidos pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de PM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 12 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de PM**

Hs [m]		5.50		6.50		7.50		8.00	
Zona	Sonda	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]
Batedor	1	6.59	9.81	7.50	9.81	8.73	10.14	9.36	10.11
1/2 Canal	2	7.11	10.61	7.98	10.66	9.20	9.89	9.97	9.94
	3	5.72	10.28	6.52	10.30	7.47	10.26	7.91	10.26
	4	5.81	9.72	6.51	9.52	7.39	9.66	7.95	9.95
Junto á obra	5	5.93	10.28	6.74	10.19	7.61	10.27	8.09	10.65
	6	5.38	9.47	6.07	9.51	6.88	9.12	7.23	9.95
	7	5.76	10.63	6.64	10.66	7.53	10.27	8.11	10.65



**Figura 61 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 10$  s e nível de maré de PM**

### Período $T_p = 14$ s e nível de maré de BM

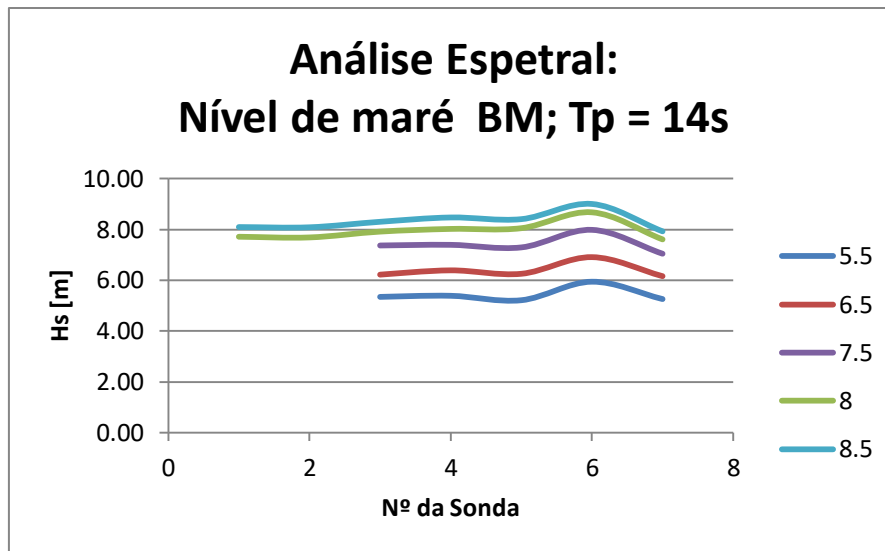
Na Tabela 13, Tabela 14 e na Figura 62, apresentam-se os valores obtidos pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de BM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 13 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de BM ( Hs = 5.5 a 7.5 )**

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]
Batedor	1	5.20	14.15	6.01	13.07	7.09	13.81
1/2 Canal	2						
	3	5.35	13.91	6.22	13.68	7.37	13.79
	4	5.39	14.38	6.39	14.40	7.40	14.33
Junto á obra	5	5.22	14.38	6.26	15.31	7.30	14.33
	6	5.95	14.16	6.91	14.29	7.99	13.81
	7	5.26	13.90	6.16	13.07	7.05	13.77

**Tabela 14 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de BM ( Hs = 8.0 e 8.5 )**

Hs [m]		8.00		8.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]
Batedor	1	7.72	13.90	8.10	13.84
1/2 Canal	2	7.69	13.64	8.09	14.35
	3	7.92	13.72	8.30	13.83
	4	8.02	14.27	8.48	14.33
Junto á obra	5	8.05	14.27	8.41	14.35
	6	8.68	14.26	9.01	14.35
	7	7.61	14.25	7.93	13.84



**Figura 62 – Altura significativa de onda (Hs) obtida pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de BM**

Tal como referido no ponto anterior, devido à ocorrência de problemas nos registos da agitação na sonda 2, para os três primeiros ensaios, não se apresentam os respetivos valores dos parâmetros de agitação.

### **Período $T_p = 14$ s e nível de maré de PM**

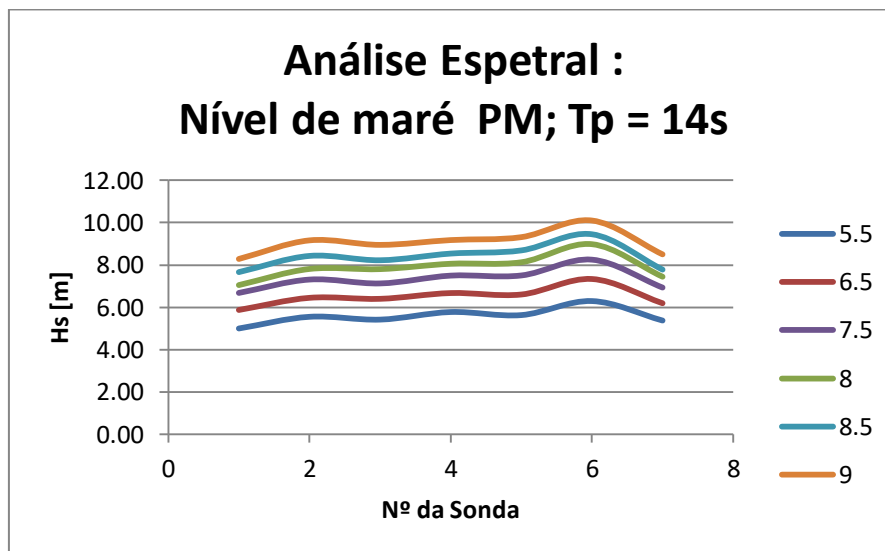
Na Tabela 15, Tabela 16 e na Figura 63 apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de PM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 15 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de PM (  $H_s = 5.5$  a  $7.5$ )**

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	5.00	14.40	5.87	14.55	6.68	14.51
1/2 Canal	2	5.55	14.96	6.45	15.01	7.31	14.31
	3	5.42	13.47	6.40	13.60	7.13	13.65
	4	5.78	14.31	6.67	14.17	7.50	14.30
Junto á obra	5	5.63	14.98	6.61	15.00	7.51	15.00
	6	6.30	14.93	7.34	14.18	8.25	14.30
	7	5.38	14.10	6.19	14.18	6.93	14.28

**Tabela 16 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de PM (  $H_s = 8.0$  a  $9.0$ )**

Hs [m]		8.00		8.50		9.00	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	7.05	14.39	7.66	13.58	8.28	14.39
1/2 Canal	2	7.81	14.28	8.43	14.96	9.16	14.21
	3	7.80	13.53	8.22	13.50	8.95	14.17
	4	8.06	14.23	8.54	14.24	9.18	14.18
Junto á obra	5	8.13	15.03	8.69	14.99	9.32	14.20
	6	8.98	14.23	9.45	14.25	10.10	14.18
	7	7.45	14.16	7.78	14.24	8.50	14.20



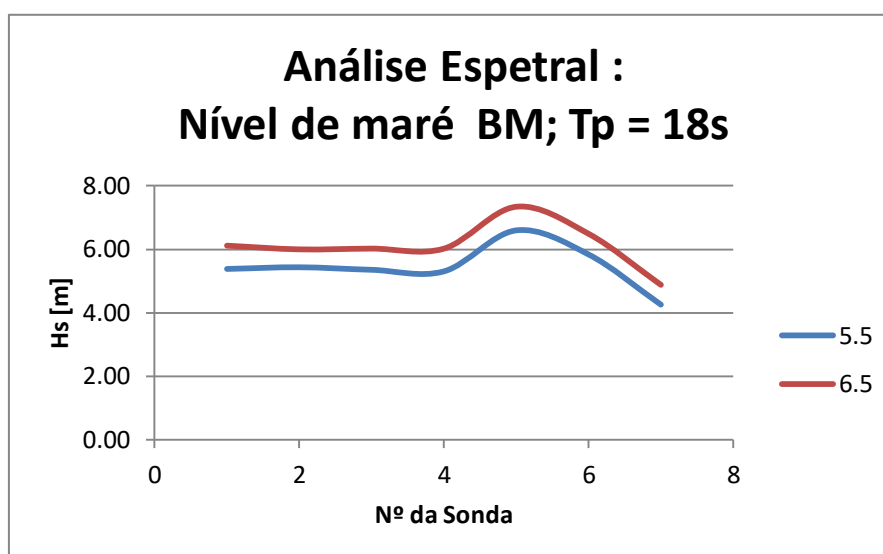
**Figura 63 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 14$  s e nível de maré de PM**

### Período $T_p = 18$ s e nível de maré de BM

Na Tabela 17 e na Figura 64, apresentam-se os valores obtidos pelo programa SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de BM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 17 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de BM**

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]
Batedor	1	5.38	17.42	6.12	18.70
1/2 Canal	2	5.43	18.03	6.00	17.67
	3	5.35	17.42	6.02	16.45
	4	5.30	19.16	6.02	18.72
Junto á obra	5	6.60	18.03	7.34	18.22
	6	5.84	18.03	6.49	17.63
	7	4.26	17.57	4.88	16.47



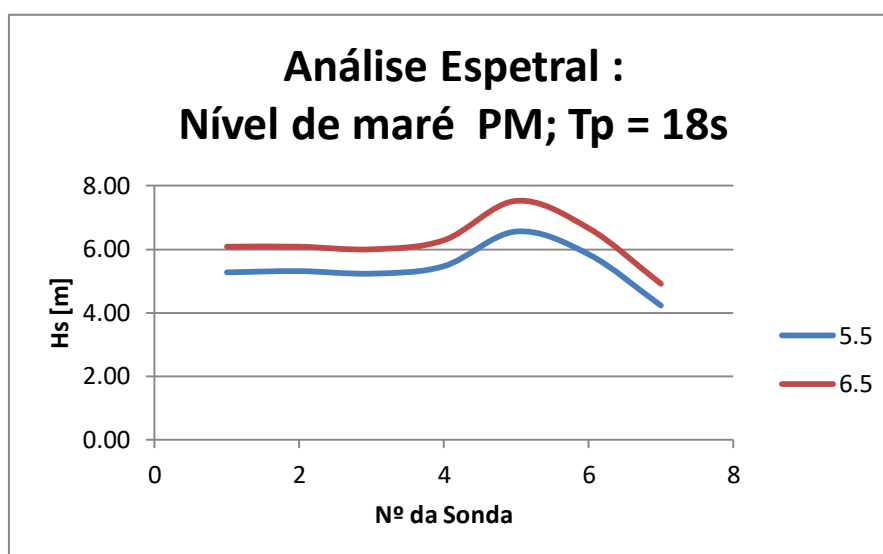
**Figura 64 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de BM**

### Período $T_p = 18$ s e nível de maré de PM

Na Tabela 18 e na Figura 65, apresentam-se os valores obtidos pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de PM, ao longo do canal, para cada uma das alturas significativas de onda incidente testadas.

**Tabela 18 – Resultados obtidos pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de PM**

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	$T_p$ [s]	Hs [m]	$T_p$ [s]
Batedor	1	5.27	18.13	6.08	18.16
1/2 Canal	2	5.31	17.30	6.08	17.11
	3	5.23	20.12	6.00	17.11
	4	5.47	19.85	6.29	18.16
Junto á obra	5	6.56	18.09	7.53	18.11
	6	5.84	18.09	6.67	18.11
	7	4.23	12.29	4.91	12.31



**Figura 65 – Altura significativa de onda ( $H_s$ ) obtida pelo SAM para  $T_p = 18$  s e nível de maré de PM**

Após a análise de todos os dados foi possível comparar os valores obtidos para Hs referentes à análise espectral e à análise temporal. Verificou-se para ambas as análises que os valores não diferem muito entre si sendo que a maior diferença de valores registada foi na ordem dos 7,4% e a maioria dos valores se encontram abaixo dos 3%. Tal permite concluir que os dois tipos de análise são bastante semelhantes.

De modo a facilitar a observação dos dados irão ser apresentados no Anexo 1 tabelas comparativas em modo de variação percentual da análise espectral vs análise temporal.

O comportamento dos valores de Hs é aproximadamente o mesmo quando comparados o nível de BM e o de PM tanto para a análise espectral como para a análise no que diz respeito a máximos, mínimos e evolução dos valores ao longo do posicionamento das sondas, exceção verificada para os ensaios relativos ao  $T_p=14s$  em que apenas foi possível obter os dados para duas alturas de onda (8,0 m e 8,5 m) e em que se verificou que os valores para a sonda 2 não seguiram a mesma tendência.

Para o  $T_p=10s$  o máximo valor obtido para Hs foi na sonda 2 enquanto o mínimo foi na sonda 6 e verificou-se um comportamento linear e constante dos valores de Hs entre estas 2 mesmas sondas.

Para o  $T_p=14s$  observou-se um comportamento do Hs crescente atingindo o máximo valor na sonda 6, podemos verificar ainda que o valor correspondente à primeira sonda e à sétima é aproximadamente o mesmo.

Para o  $T_p=18s$  o comportamento do Hs foi aproximadamente linear e constante nas quatro primeiras sondas atingindo um máximo no local onde a sonda 5 estava posicionada decrescendo até atingir um mínimo na última sonda.

Os valores obtidos para o nível de PM são ligeiramente maiores que os valores obtidos para o nível de BM (como seria de esperar visto se tratar de uma altura maior) tanto para o Hs como o  $T_p$  no caso da análise espectral e o  $T_s$  no caso da análise temporal como podemos observar no Anexo 2 e Anexo 3.

## 7.2. Análise da Estabilidade

O método utilizado para a análise da Estabilidade foi o Método da contagem visual. Para a aplicação deste método é necessário efetuar a contagem do número total de elementos presentes no pé do talude e no manto resistente. Durante o ensaio é necessário observar e registar todo o tipo de movimentos e quedas de cada bloco com a finalidade de caracterizar percentualmente, em relação àqueles totais, os elementos envolvidos em cada uma daquelas acções (movimentos ou quedas).

Considera-se que existe uma queda de um bloco cada vez que este se movimentar da sua posição original numa distância igual ou superior ao seu diâmetro nominal.

Os critérios de classificação de quedas e de movimentos de blocos utilizados pelo LNEC (Lemos e Silva, 2004) são apresentados na Tabela 19 e na Tabela 20.

O modelo foi reconstruído manualmente ao fim de cada Tp testado.

**Tabela 19 – Critério de classificação de movimentos de blocos do manto resistente em ensaios bidimensionais**

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Muito Ligeiros	Têm movimentos 0-2 % do número de blocos da 1ª camada	Não há movimentos de conjunto
1	Ligeiros	Têm movimentos 2-5 % do número de blocos da 1ª camada	
2	Pequenos	Têm movimentos 5-10 % do número de blocos da 1ª camada	
3	Moderados	Têm movimentos 10-15 % do número de blocos da 1ª camada	
4	Muitos	Têm movimentos 15-20 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
5	Sérios	Têm movimentos 20-30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
6	Muito Sérios	Têm movimentos mais de 30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	

**Tabela 20 – Critério de classificação de quedas de blocos do manto resistente em ensaios bidimensionais**

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Muito Ligeiras	Removidos 0-1 % do número total de blocos (1ª e 2ª camadas)	As falhas na 1ª camada são inferiores a 5 blocos
1	Ligeiras	Removidos 1-2 % do número total de blocos	
2	Pequenas	Removidos 2-3 % do número total de blocos	
3	Moderadas	Removidos 3-5 % do número total de blocos ou falhas de 5-10 unidades na 1ª camada	
4	Muitas	Grandes falhas na 1ª camada (superiores a 10 blocos)	
5	Sérias	A 1ª camada foi removida numa grande área; falhas na 2ª camada; núcleo ou filtros do quebra-mar visíveis	
6	Destruição	As duas camadas foram removidas numa grande área; núcleo do quebra-mar afectado	

### 7.2.1. Quedas

Para a representação das quedas dos blocos serão apresentadas fotografias tiradas antes e depois de qualquer ensaio, tanto a baixa-mar como praia-mar.

As fotografias apresentadas mostram da esquerda para a direita, o filtro do quebra-mar a vermelho, o enrocamento de 60 a 90 kN a preto, o enrocamento de 10 a 40 kN a branco e finalmente 3 camadas de tetrápodos de 300 kN diferenciados a vermelho, cinza e azul.

A contabilização do número de quedas que foram visualizadas será apresentada a partir de gráficos assim como as suas quedas acumuladas.

Período  $T_p = 10$  s



Figura 66 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para  $T_p=10$ s

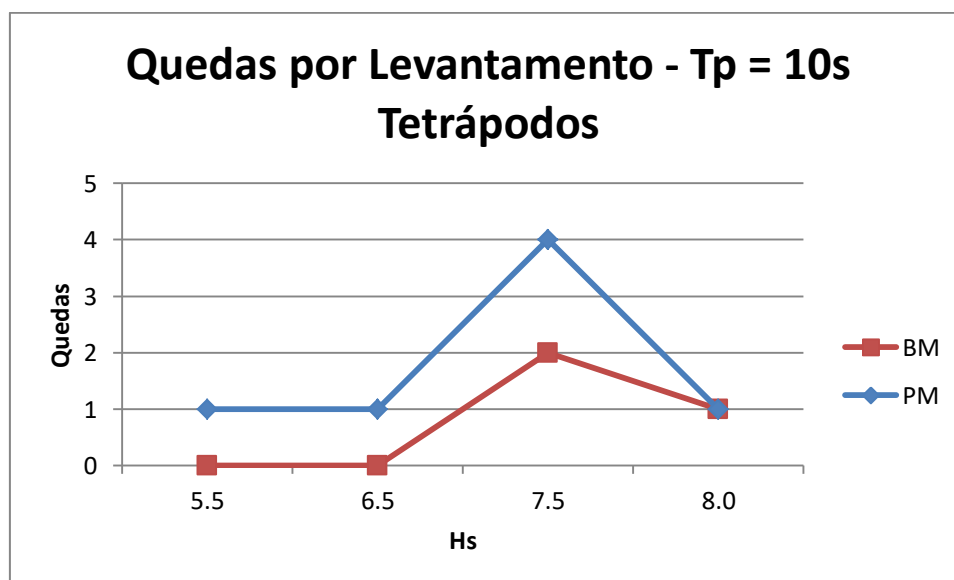


Figura 67 – Quedas por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=10$ s

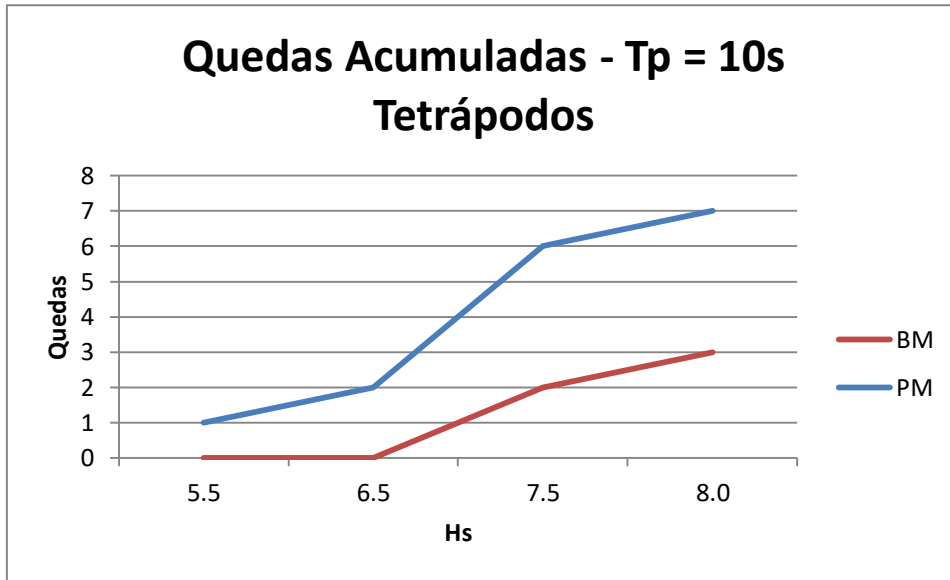


Figura 68 – Quedas acumuladas dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=10s$

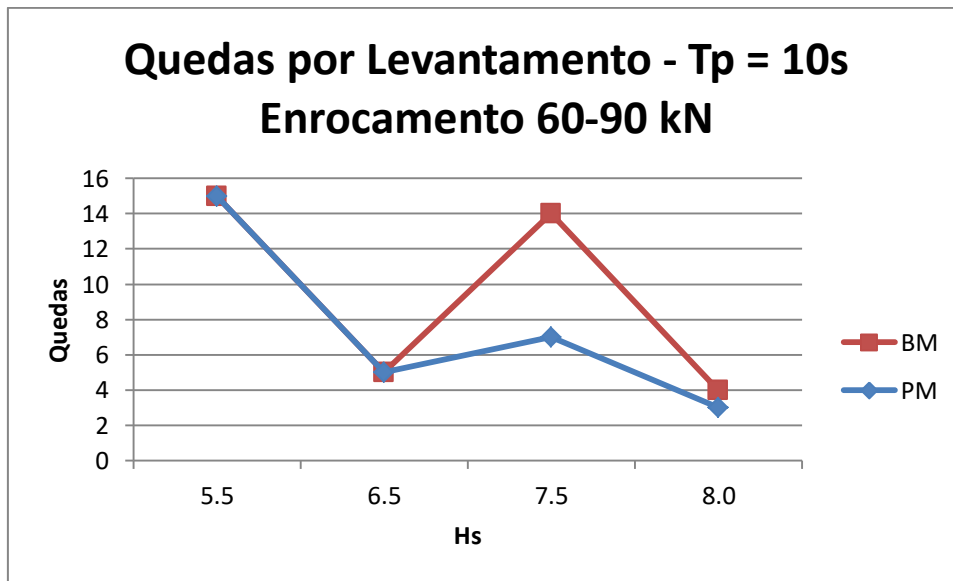
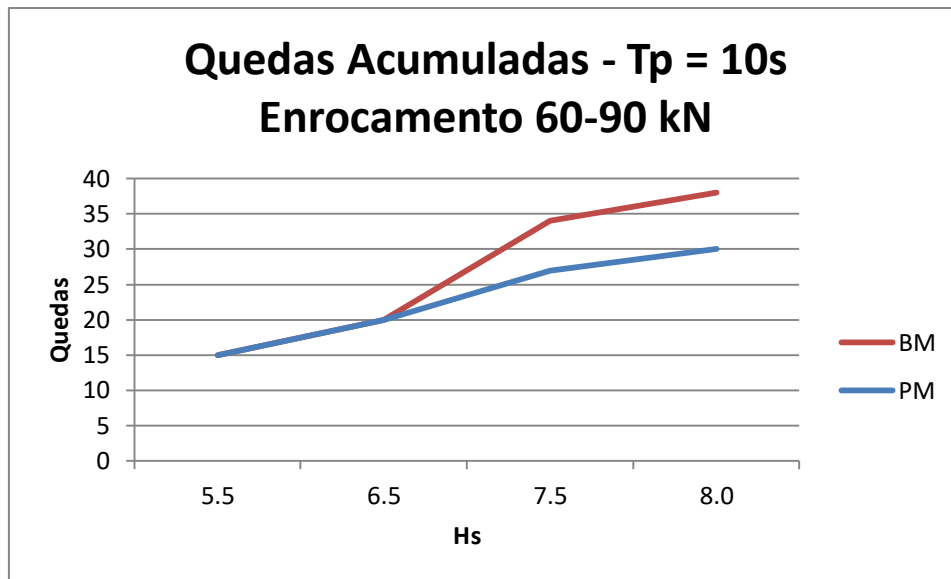


Figura 69 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=10s$



**Figura 70 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=10s$**



**Figura 71 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para  $T_p=10s$**



**Figura 72 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para  $T_p=10s$**

**Período  $T_p = 14 s$**



**Figura 73 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para  $T_p=14s$**

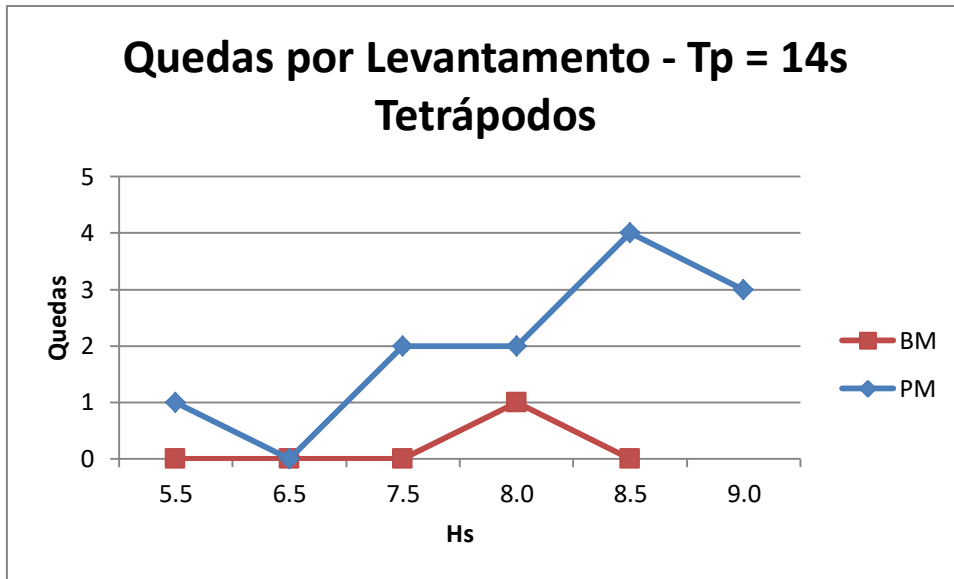


Figura 74 – Quedas por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=14s$

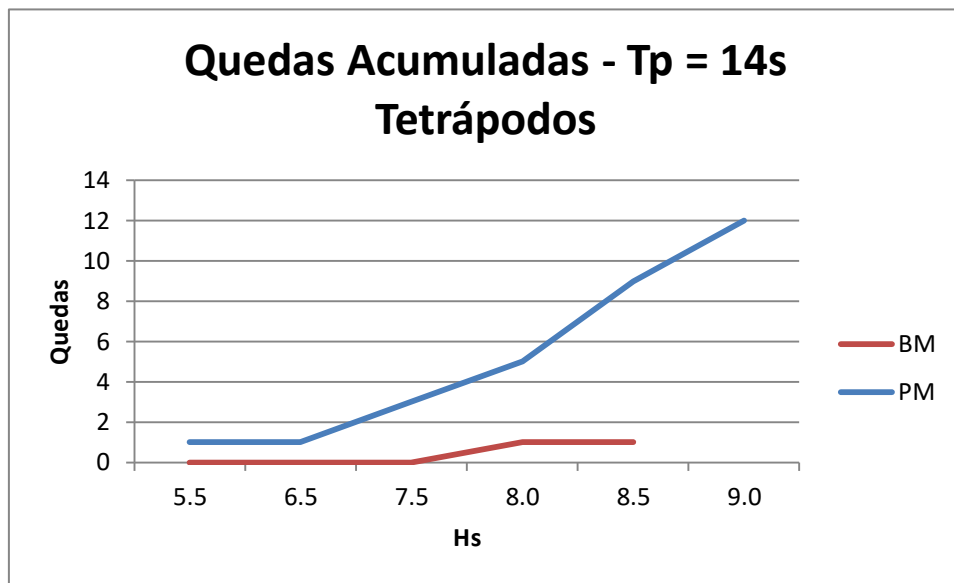


Figura 75 – Quedas acumuladas dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=14s$

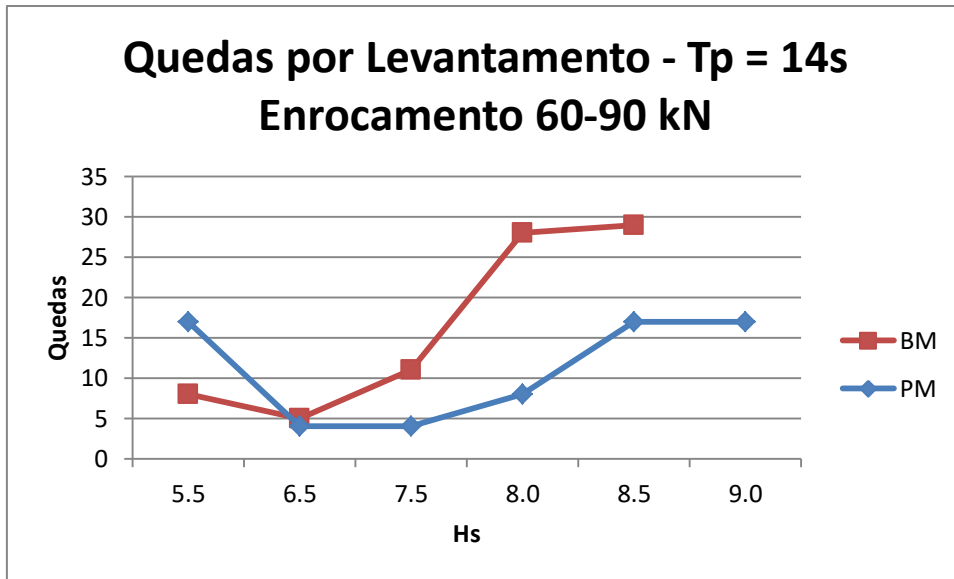


Figura 76 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=14s$

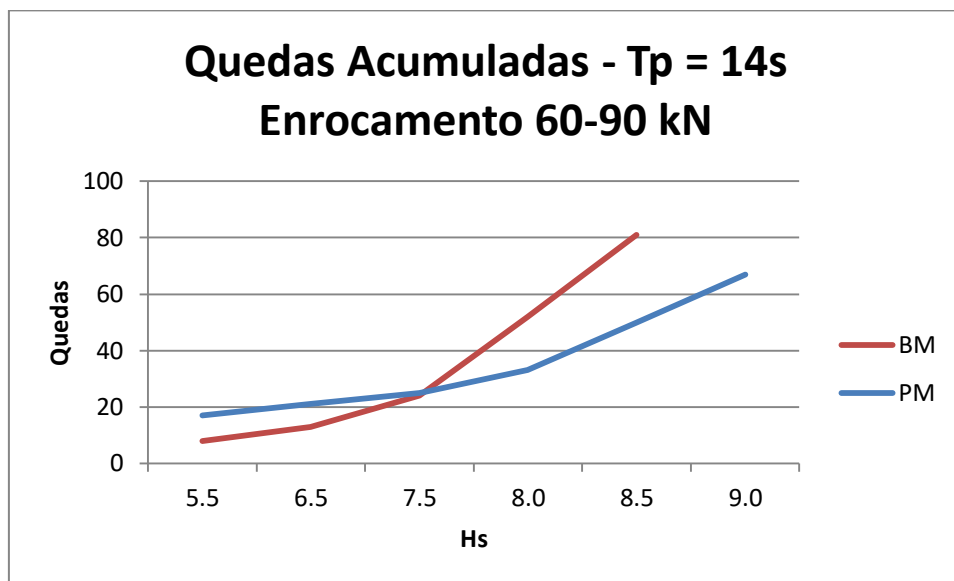


Figura 77 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=14s$



**Figura 78 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para  $T_p=14s$**



**Figura 79 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para  $T_p=14s$**

**Período  $T_p = 18$  s**



**Figura 80 – Fotografia do modelo antes dos ensaios para  $T_p=18s$**

Não foi registada qualquer queda de tetrápodos durante o ensaio relativo a  $T_p=18s$  por isso não serão apresentados os gráficos referentes a esse ensaio.

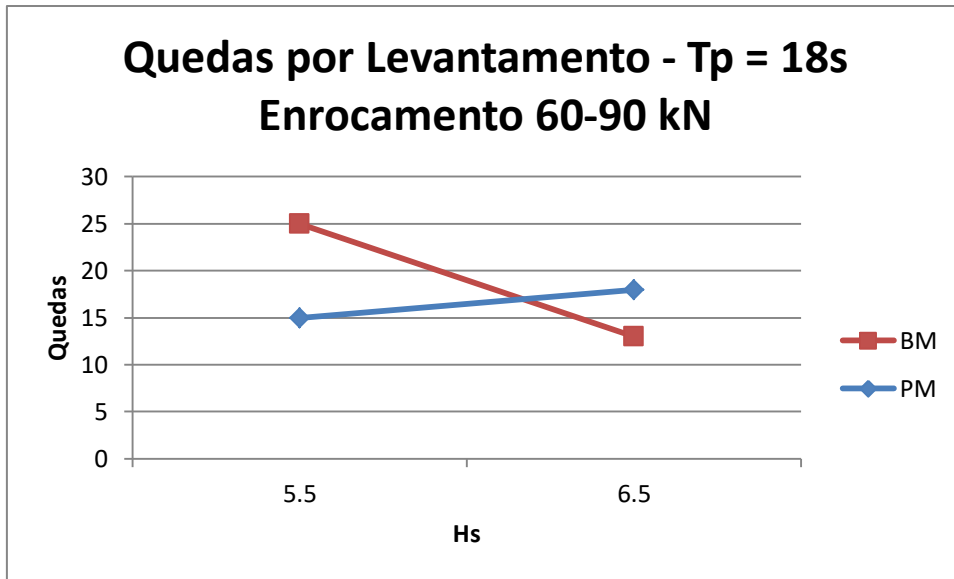


Figura 81 – Quedas por levantamento do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=18s$

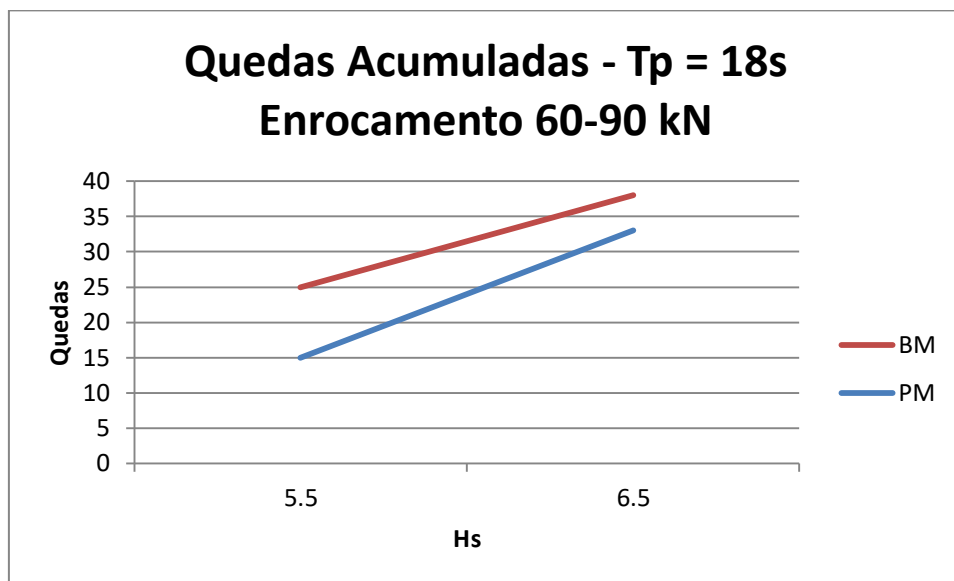


Figura 82 – Quedas acumuladas do enrocamento da banquetta do pé do talude para  $T_p=18s$



**Figura 83 – Fotografia do modelo depois do ensaio BM para  $T_p=18s$**



**Figura 84 – Fotografia do modelo depois do ensaio PM para  $T_p=18s$**

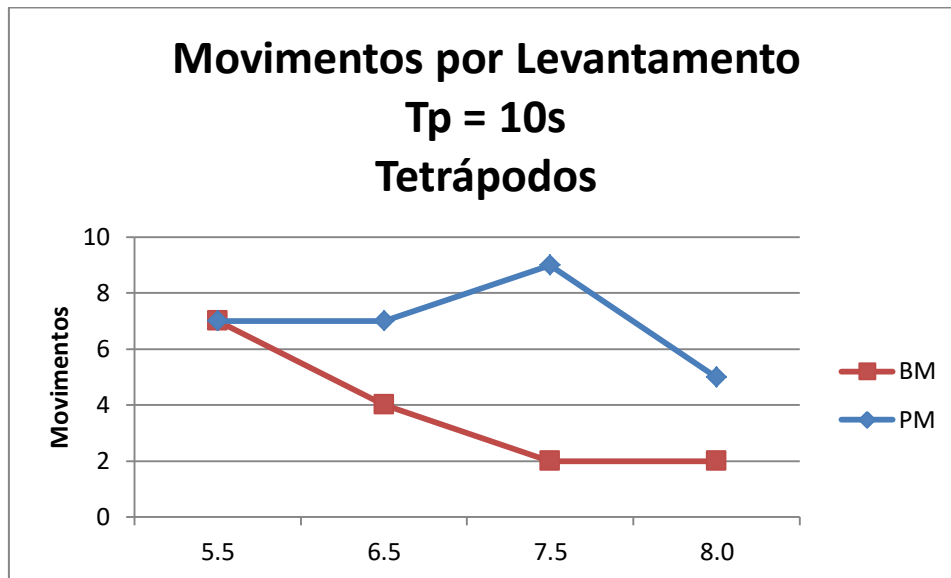
Após a análise dos dados relativamente às quedas acumuladas de tetrápodos do manto resistente e das quedas acumuladas do enrocamento na banquetta do pé do talude é possível identificar uma tendência de quedas crescentes com o aumento da altura de onda ( $H_s$ ) e do período de pico ( $T_p$ ) em todos os ensaios. Verifica-se que, no caso das quedas acumuladas dos tetrápodos do manto resistente, existe maior número de quedas no nível de maré de PM do que no nível de maré de BM. O inverso acontece para as quedas acumuladas do enrocamento na banquetta do pé do talude, em que o maior número de quedas acontece durante o nível de maré de BM. Isto ocorre pelo fato da onda incidir com maior frequência na zona dos tetrápodos para o nível de PM e de incidir com maior frequência na zona do pé do talude para o nível de BM.

### **7.2.2. Movimentos**

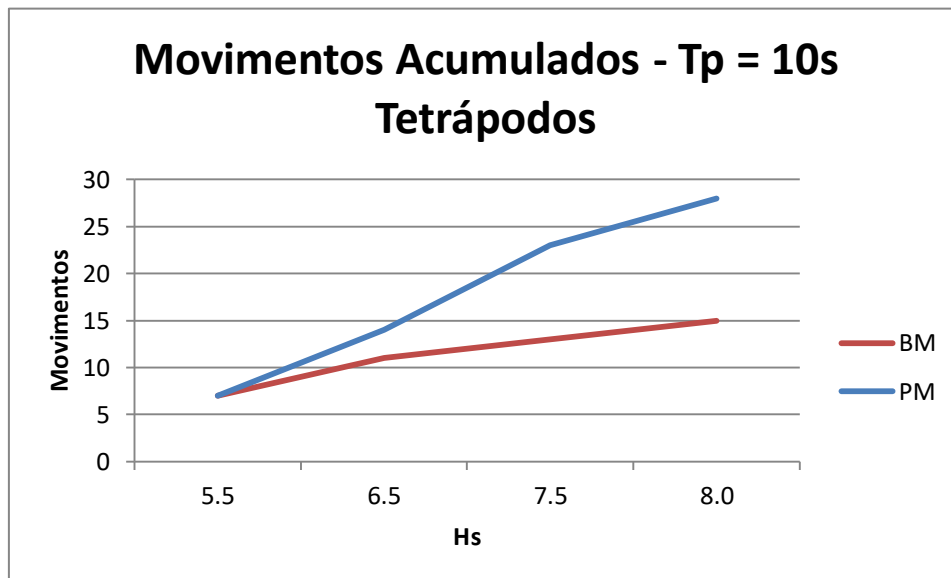
A contabilização do número de movimentos será apresentada a partir de gráficos unitariamente e percentualmente assim como os movimentos acumulados.

Concluindo irá ser apresentado um gráfico que relaciona o grau de movimentos com o aumento da altura significativa, tanto para baixa-mar como para praia-mar.

**Período  $T_p = 10$  s**



**Figura 85 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=10s$**



**Figura 86 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=10s$**

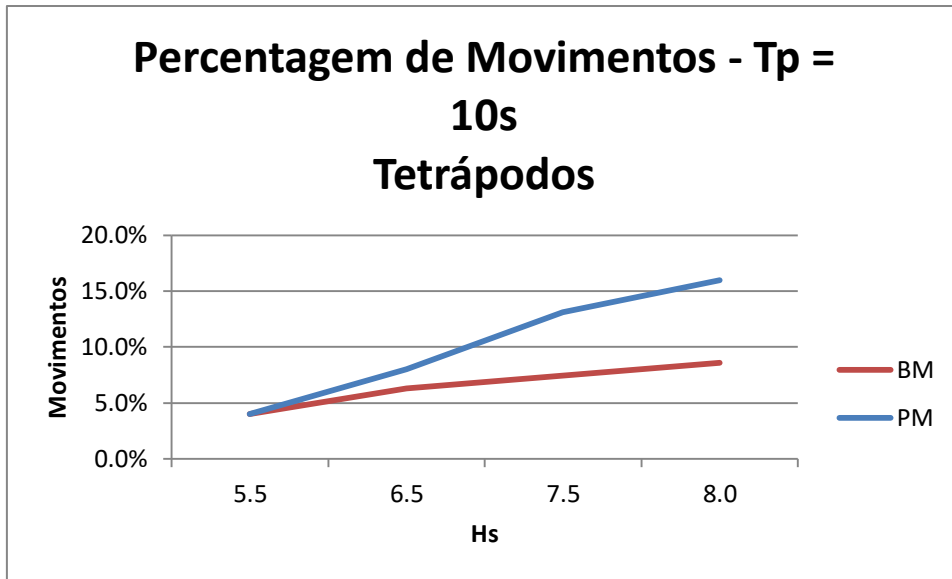


Figura 87 – Percentagem de movimentos dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=10s$

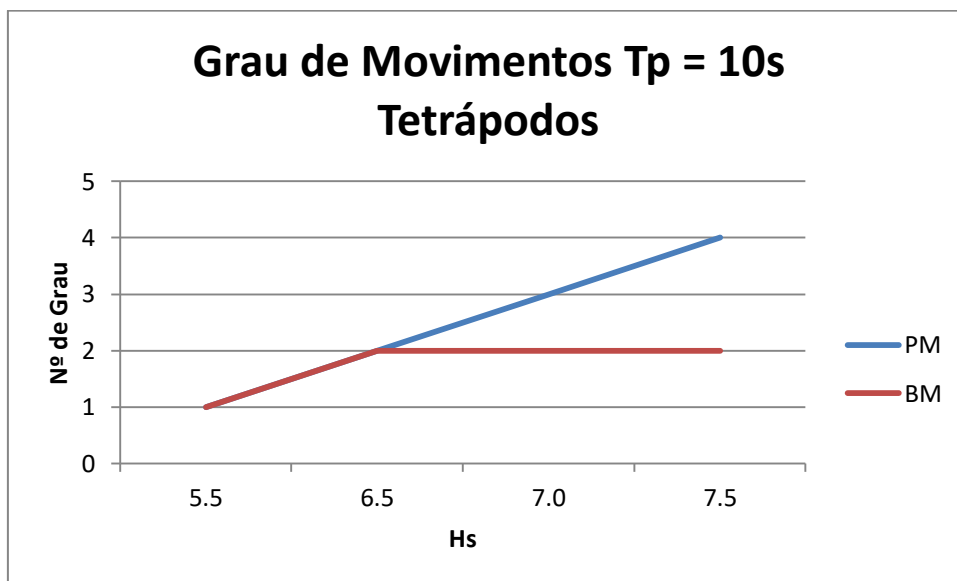
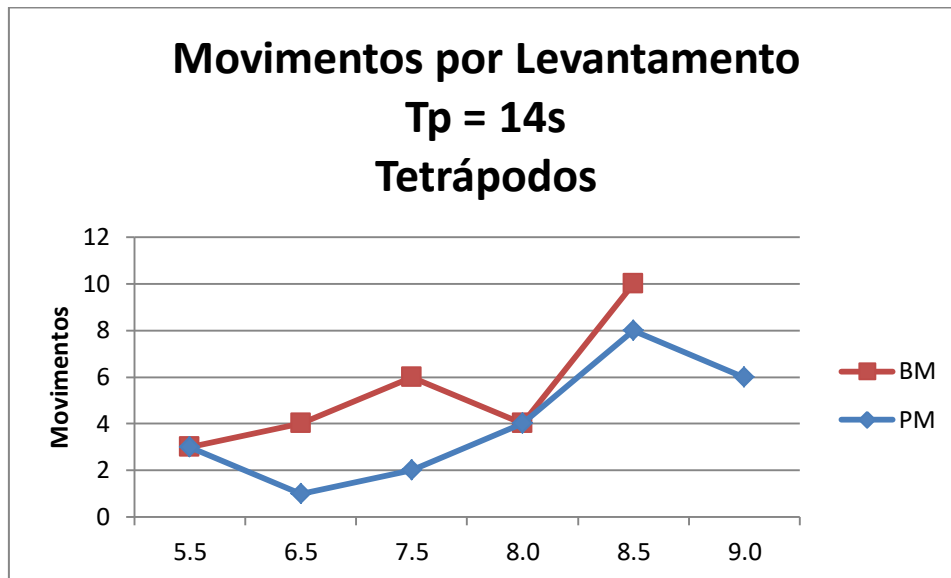
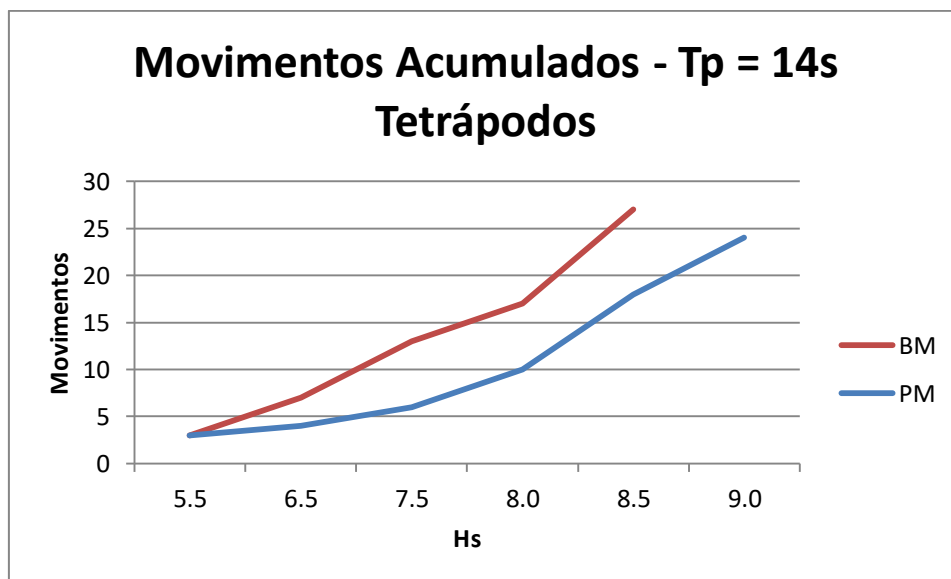


Figura 88 – Grau de Movimentos para  $T_p=10s$

**Período  $T_p = 14$  s**



**Figura 89 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=14$ s**



**Figura 90 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=14$ s**

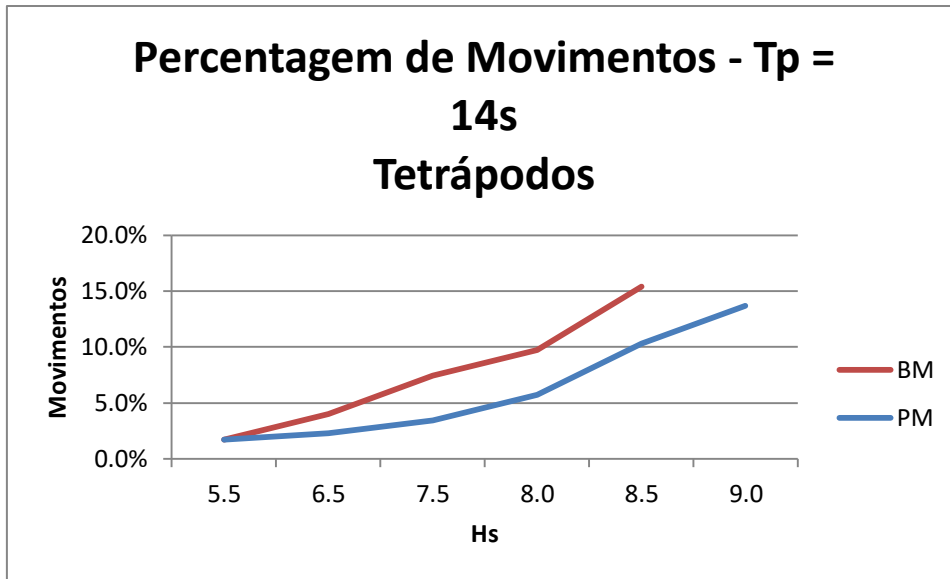


Figura 91 – Percentagem de movimentos dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=14s$

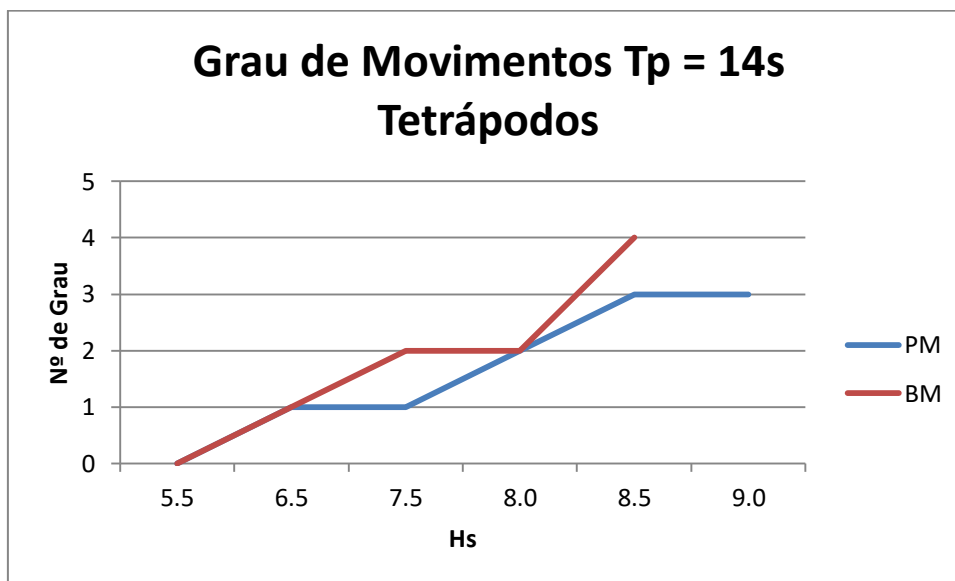


Figura 92 – Grau de Movimentos para  $T_p=14s$

Período  $T_p = 18$  s

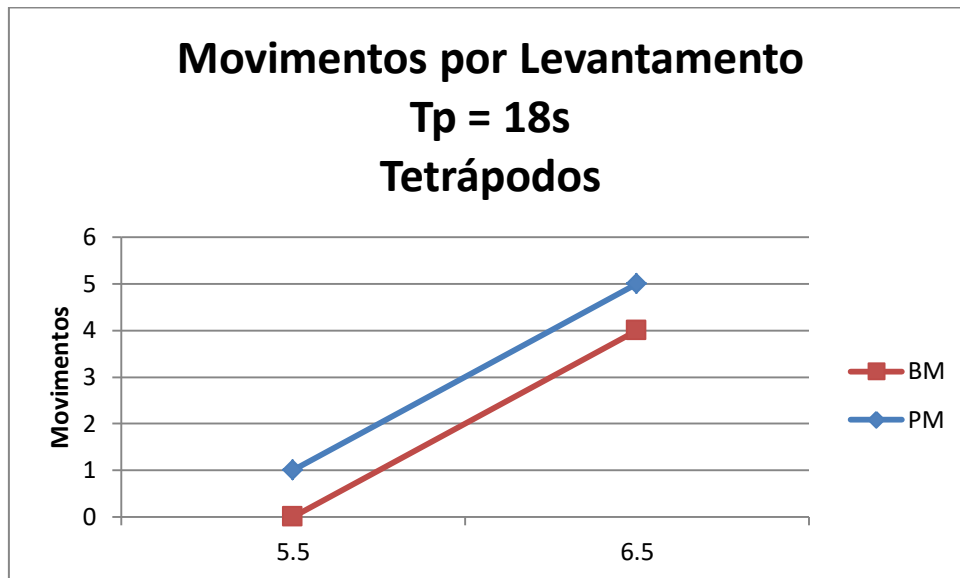


Figura 93 – Movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=18s$

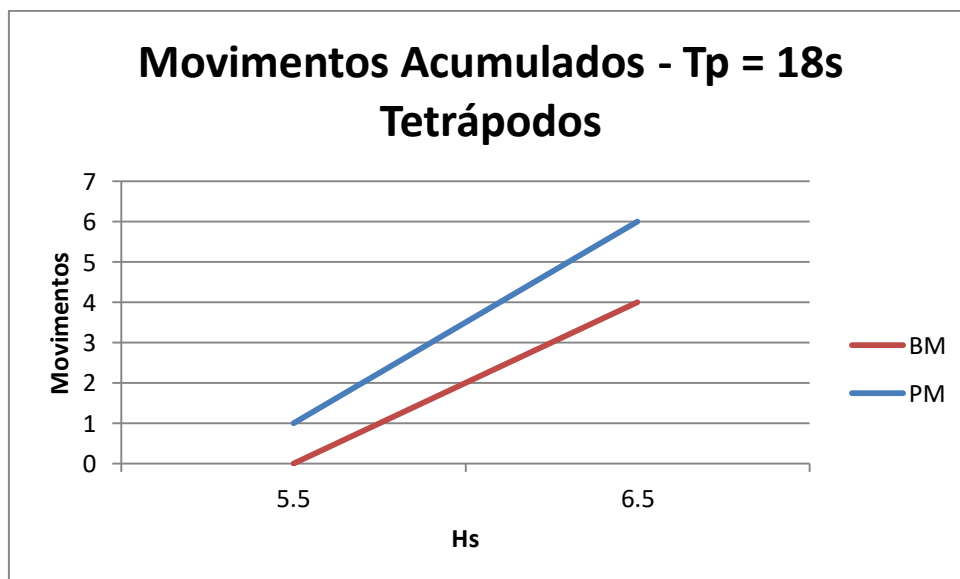


Figura 94 – Movimentos acumulados dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=18s$

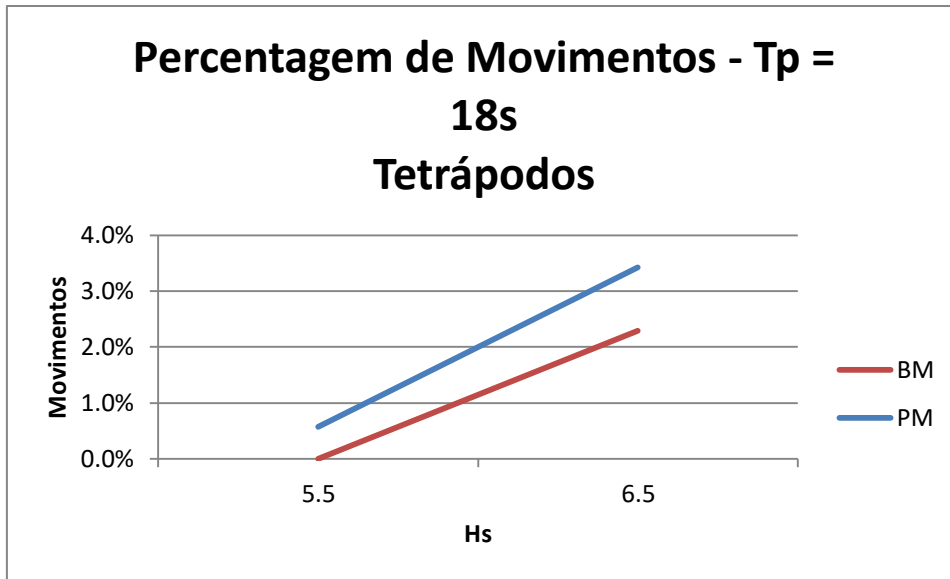


Figura 95 – Percentagem de movimentos por levantamento dos tetrápodos do manto resistente para  $T_p=18s$

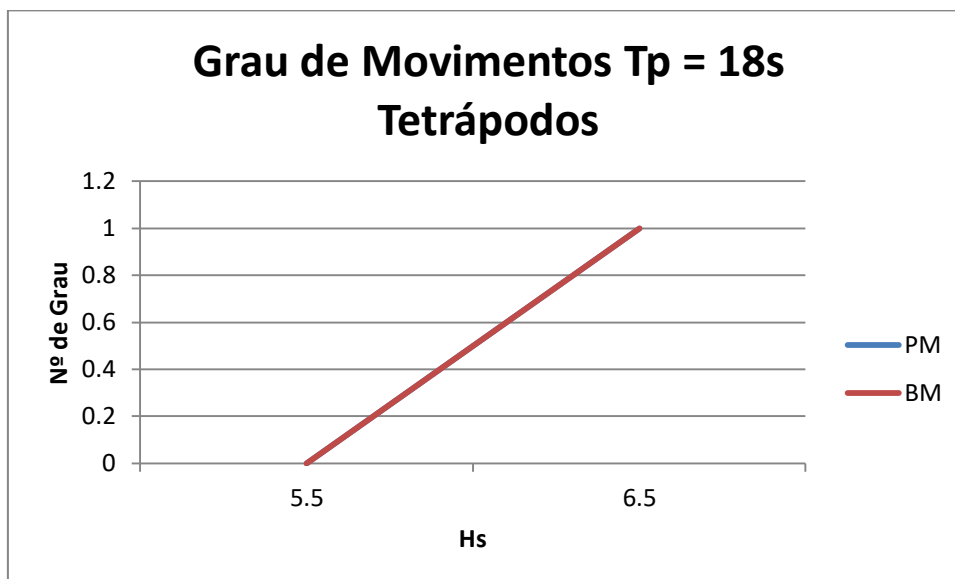


Figura 96 – Grau de Movimentos para  $T_p=18s$

Na análise de estabilidade através do método de contagem visual para o  $T_p = 10s$  observou-se um total de 7 quedas e 28 movimentos durante os ensaios de PM e 3 quedas e 15 movimentos para os de BM.

Com os ensaios realizados com  $T_p = 14s$  observaram-se 12 quedas e 24 movimentos para o nível de PM. Importa realçar o fato dos ensaios de BM só terem sido realizados até ao  $H_s = 8.5$  m, sendo o valor para quedas e movimentos para a PM de 9 e 18 respetivamente, enquanto para a BM é de 1 e 27.

Com a atuação do  $T_p=18s$  não foram observadas quedas e apenas se registaram 6 movimentos no caso de PM e 4 no caso de BM. Estes dados revelam que ocorre um maior número de quedas e de movimentos com os ensaios para o nível de PM do que com a BM. Pode observar-se estes dados nas tabelas no anexo 4.

É ainda possível notar que o valor de quedas por ensaio corresponde ao grau 0 e 1, isto é a quedas ligeiras e muito ligeiras respetivamente. No que diz respeito ao grau de movimentos é possível notar que ao fim dos ensaios de  $T_p = 10s$  obtém-se um grau de movimentos de 4 (muitos) para o nível de PM e de 2 (pequenos) para BM. Para o ensaio de  $T_p = 14s$  e para o nível de maré de PM verificaram-se movimentos de grau 3 (moderados) enquanto para o nível de maré de BM foi de grau 4 (muitos), para os ensaios de  $T_p=18s$  para ambos os níveis de maré os movimentos foram de grau 1, ou seja ligeiros.

### **7.2.3. Confirmação Teórica pela Fórmula de Hudson**

Para esta confirmação teórica foi aplicada a equação matemática desenvolvida por Hudson, que se encontra explanada no subcapítulo 2.3, para todas as alturas de onda testadas. Assim, pretendeu-se saber o ponto a partir do qual o aumento da altura de onda começa a comprometer a estabilidade, podendo assim comparar-se com as análises anteriores.

Esta análise tem como objetivo obter o valor para o peso de cada tetrápodo fazendo variar o valor de altura significativa ( $H_s$ ). Partindo deste pressuposto os valores iniciais utilizados para o cálculo encontram-se apresentados na Tabela 21:

**Tabela 21 – Dados iniciais para o cálculo de W**

Dados		Unidades
$\gamma_s$	24	$\text{KN/m}^3$
$\gamma_w$	10	$\text{KN/m}^3$
$K_D$	8	-
$S_r$	2.4	-
<b>Cotg(<math>\alpha</math>)</b>	1.5	-

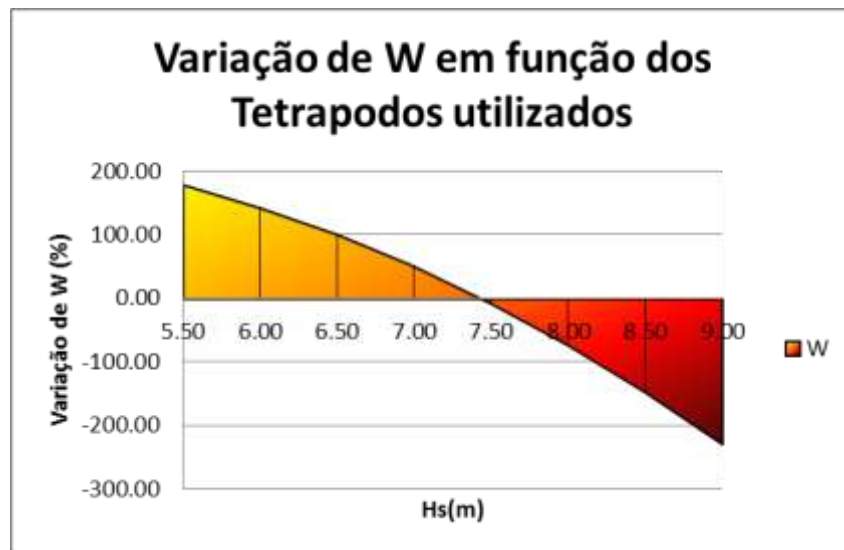
O valor de  $S_r$  é dado pela razão de  $\gamma_s$  com  $\gamma_w$ .

Os valores para o peso unitário do bloco (W) obtidos encontram-se apresentados na Tabela 22:

**Tabela 22 – Valores de W obtidos pela fórmula de Hudson**

Hs (m)	W (kN)
5.50	121.26
6.00	157.43
6.50	200.16
7.00	250.00
7.50	307.49
8.00	373.18
8.50	447.61
9.00	531.34

Sabendo que o peso unitário de cada bloco utilizado no protótipo é de 300kN foi criado o seguinte gráfico (em percentagem) que demonstra a partir de que altura de onda significativa, o peso do bloco não corresponde ao necessário para ser garantida a estabilidade hidráulica do manto resistente.



**Figura 97 – Variação de W em função dos tetrápodos utilizados**

A confirmação teórica mostrou que para uma altura de onda significativa inferior a 7.48m o manto hidráulico estaria sobredimensionado. A partir desse valor de Hs a massa dos blocos utilizados no manto de tetrápodos não seria suficiente para garantir a estabilidade do quebra-mar, estaria subdimensionado.

De forma a garantir a estabilidade para todas as alturas de onda significativas poderíamos:

- Manter o declive do talude e aumentar o peso unitário de cada tetrápodo;
- Aumentar a densidade de colocação, caso a obra se revele instável após a realização de ensaios em modelo físico reduzido;
- Alterar o declive do talude do quebra-mar.

## 8. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivos numa primeira fase a realização de ensaios em modelo físico reduzido no canal de ondas irregulares (COI 1) situado no LNEC, seguido do tratamento e análise dos dados utilizando diferentes métodos. As análises temporal e espectral foram realizadas com recurso ao programa SAM e o método de análise visual foi realizado durante todos os ensaios através da contagem de movimentos e/ou queda de blocos enquanto a confirmação teórica foi calculada com base na fórmula matemática de Hudson.

No capítulo 2 foram descritos os diferentes tipos de quebra-mar assim como as suas funções, ações importantes a ter em consideração em quebra-mares e os respetivos tipos de falha associados aos mesmos, tendo sido feita ao longo do capítulo uma elucidação através de figuras de modo a facilitar a compreensão dos conceitos. No fim do capítulo foi exposto o pré-dimensionamento tipo segundo Pita, finalizando com a fórmula de Hudson.

No capítulo 3 foram apresentados alguns conceitos necessários para a compreensão de modelação física e a classificação de cada ensaio consoante os seus objetivos. Abordou-se ainda o tema da relação de semelhança e escolha de escala assim como fontes de erros e efeitos de escala.

No capítulo 4 foram apresentadas algumas noções teóricas sobre agitação marítima consideradas interessantes e outras delas indispensáveis para a compreensão do trabalho realizado, nomeadamente o método do zero-ascendente que foi o método utilizado para a análise temporal e o modo de funcionamento do método de análise espectral e os pressupostos desse mesmo método.

No capítulo 5 foi apresentado o caso de estudo, a localização do mesmo através de figuras, algumas características e uma figura do estado do quebra-mar da Praia da Vitória depois da tempestade que deu origem a este estudo.

No capítulo 6 foram apresentadas as instalações do LNEC onde decorreram os ensaios, assim como todos os equipamentos utilizados durante os ensaios bem como o plano dos

mesmos. No último ponto deste capítulo foi exposta a principal ferramenta informática utilizada durante os ensaios. Neste subcapítulo são referidos os módulos do programa SAM, e os módulos utilizados durante as análises efetuadas, assim como as interfaces das várias análises com o utilizador.

No capítulo 7, foram apresentados os dados tratados retirados a partir do SAM referentes às análises espectral e temporal com o intuito de uma possível comparação de valores, foram referidos ainda alguns imprevistos que ocorreram durante os ensaios. Foi feita ainda uma análise da estabilidade em que foi feita uma contagem visual durante os ensaios realizados, tendo em vista a quantificação do número de quedas e do número de movimentos. De modo a obter algum material teórico de análise foi feita uma confirmação teórica utilizando a fórmula matemática de Hudson com o objetivo de sabermos a partir de que  $H_s$  a estrutura deixa de estar estável.

Após a utilização do *software* SAM verificou-se que possui um vasto leque de utilidades no âmbito da realização de ensaios em modelo físico reduzido e que a sua interface com o utilizador é bastante autodidata. Relativamente às análises realizadas no SAM verifica-se que os valores obtidos são similares, tal fato permite concluir que os dois tipos de análises são semelhantes.

A contagem da queda/movimentos de blocos é condicionada pela experiência do utilizador, principalmente pelo fato da duração dos tempos de cada ensaio. Verificou-se ainda que os ensaios de Baixa-mar afetam mais o pé do talude do quebra-mar, enquanto os ensaios de Preia-mar afetam mais o manto hidráulico.

A fórmula de Hudson indica o valor de 7.48m de altura de onda significativa ( $H_s$ ) como o ponto máximo de estabilidade do quebra-mar, o que corresponde também ao valor em que o número de quedas de tetrápodos aumenta.

## 9. REFERÊNCIAS

- ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. (2009) – Obras e Gestão de Portos e Costas. A Técnica Aliada ao Enfoque Logístico. Blucher, São Paulo, Brasil.
- BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. (1999) – A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geographical Research*, C4, 104, 7649-7666.
- CAPITÃO, R. (2002) – Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima – Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- CAPITÃO, R.; FORTES, C.J. (2013) – Curso de concepção e observação de obras marítimas e portuárias, Módulo 2: Agitação Marítima. Laboratório de Engenharia de Angola, 18-29 Novembro 2013, Luanda
- CAPITÃO, R.; FORTES, C.J.; LEMOS, R.L. (2017) – Observação Sistemática de Obras Marítimas. Estruturas marítimas da costa oeste de Portugal continental. Campanhas de observação visual efetuadas em 2016. LNEC - Proc. 0603/121/12074. Nota Técnica 25/2017 – DHA/NPE.
- CIRIA; CUR; CETMEF. (2007) – The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering. C683, CIRIA, Londres.
- COVELD, E.M.; VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B. (2005) – Neural Network: Manual NN\_OVERTOPPING 2. CLASH WP8 – Report.
- CRUZ, D. F. V. (2008) – Estruturas Portuárias – Possibilidades e desafios no dimensionamento de quebra-mares. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal.
- FERREIRA, R. M. C. M. (2016) – Análise de dados de agitação num ponto da costa marítima portuguesa. Implicações para o dimensionamento de quebra-mares verticais. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

- FORTES, C.J.E.M. (1993) – Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.; SANTOS, J.A. (2010) – Análise temporal, espectral e de erros no pacote SOPRO. Aplicações. Proc. 10º Congresso da Água, Alvor.
- HEITOR, D. J. (2014) – Classificação da Intensidade Energética no Litoral de Espinho. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- HOLTHUIJSEN, L. H. (2007) – Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge University Press.
- LEMOS, R.; SILVA, L.G. (2004) – Ensaio de Estabilidade e Galgamento em Modelo Reduzido Bidimensional do Perfil de Reparação do Molhe Sul do Porto da Praia da Vitória - Açores. Relatório 219/04 - NPE, LNEC, NPE, Lisboa, Portugal.
- LIU, Z., FRIGAARD, P. (2001) – Generation and Analysis of Random Waves. Aalborg, Aalborg Universitet, Denmark.
- LOPES, H.G. (2013) – Experimental Analysis of the Interaction between Waves and a Rubble-Mound Breakwater protected by a Detached Breakwater, using Video Imagery Techniques. The Port of Leixões Case; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil; FEUP; Porto.
- MUNK, W.H. (1950) – Origin and generation of waves – Proceedings first Conference Coastal Engineering, Long Beach, California, United States of America.
- NEVES, D.R.C.B.; SANTOS, J.A.; REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M.; RODRIGUES, S.; SIMÕES, A.; AZEVEDO E.B. (2012) – Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. Revista de Gestão Costeira Integrada. (no prelo: <http://www.aprh.pt/rgci/rgci322.html>).

- NEVES, D.R.C.B.; ZÓZIMO, A.C.; PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M. (2009) – GUIOMAR: new developments and application to Sines Harbor. Proc. 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, Madeira, 8 e 9 de Outubro de 2009.
- PEDRO, F. (2015) – Utilização de técnicas de análise fotogramétricas em Quebra-mares de Taludes. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Politécnico de Lisboa.
- PEREIRA, D.; LOPES, L.G.; REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M.; POSEIRO, P. (2014) – Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada. Proc. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, 24 a 26 de Junho de 2014.
- PITA, C. (1985) – Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-mares de Talude. Boletim de informação 37; LNEC, Lisboa, Portugal.
- POSEIRO, P.; ÂNGELO, J.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; SANTOS J.A.; CAPITÃO, R.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, C.; AZEVEDO, E. (2013) – Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) à Análise das Consequências de Ocorrência de Galgamentos. O Caso da Baía da Praia da Vitória. Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Lisboa, 10 e 11 de Outubro de 2013.
- POSEIRO, P.; SABINO, A.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; RODRIGUES, A. (2014) –Aplicação do Sistema de Previsão e Alerta de Inundações HIDRALERTA: Caso de estudo da Costa da Caparica. In Proceedings of the 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal.
- POSEIRO, P.; SABINO, A.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; RODRIGUES, A. (2014) –Aplicação do Sistema HIDRALERTA de Previsão e Alerta de Inundações: Caso de estudo da Praia da Vitória. In Proceedings of the 12º Congresso da Água, 5 a 8 de Março, Lisboa, Portugal.

- RAMOS, A; GABRIEL, S; FORTES, C.J.E.M. (2013) – Procedimentos para análise de registos da elevação da superfície livre em ensaios experimentais. Relatório HIDRALERTA 07/2013, Lisboa.
- RAMOS, A; GABRIEL, S; FORTES, C.J.E.M. (2014) – Análise temporal de registos da elevação da superfície livre e de velocidade em ensaios experimentais. Relatório HIDRALERTA 02/2014, Lisboa.
- REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, D.R.C.B.; RODRIGUES, S.; VIEIRA, A.S.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B. (2011) – Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta.. In Proceedings of the VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras, 4 a 8 de Abril, Boa Vista, Cabo Verde.
- ROCHA, T. (2012) – Avaliação do galgamento de estruturas portuárias. Aplicação ao porto da Praia da Vitória, Açores. Tese de mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica. FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- SANTOS, J.A.; REIS, M.T.; NEVES, D.R.C.B.; FORTES, C.J.E.M.; RODRIGUES, S.; AZEVEDO, E.B.; RODRIGUES, M.C.; SIMÕES, A.; RAMALHEIRA, J.; RAPOSEIRO, P. (2011) – Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no Porto da Praia da Vitória.. In Proceedings of the 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Porto, Portugal.
- SILVA, L.G., CAPITÃO, R., (2015) – Observação Sistemática de Obras Marítimas. Estruturas marítimas da costa oeste de Portugal continental. Campanhas de observação visual efetuadas em 2015. LNEC - Proc. 0603/121/12074. Relatório 369/2015 – DHA/NPE.
- STRAIOTO, K. M. G. T., (2006) – Estudo estatístico das Alturas de Ondas ao Largo da Ilha de Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Brasil.

TOLMAN, H. (1999) – User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III. Version 1.18, NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166, 110p., Washington, E.U.A..

TROCH, P. (2005) – User manual: Active wave absorption system. Ghent University, Department of Civil Engineering, Belgium.

USACE U. S. Army Corps of Engineers (2006) – Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100. Washington D.C., E.U.A.

## ANEXO 1 – ANÁLISE ESPETRAL VS ANÁLISE TEMPORAL

**Tabela 23 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para  $T_p=10s$  BM**

Zona	Sonda	Hs[m]			
		5.50	6.50	7.00	7.50
<b>Batedor</b>	1	2.50%	0.86%	1.53%	1.60%
<b>1/2 Canal</b>	2	1.20%	1.17%	0.90%	0.29%
	3	0.87%	0.36%	1.56%	0.23%
	4	1.42%	0.23%	0.69%	0.32%
<b>Junto á obra</b>	5	0.56%	1.82%	0.43%	1.13%
	6	2.25%	0.99%	0.46%	0.62%
	7	0.79%	0.92%	0.15%	0.62%

**Tabela 24 – Variação percentual da Análise Espetral Vs Análise Temporal para  $T_p=10s$  PM**

Zona	Sonda	Hs [m]			
		5.50	6.50	7.50	8.00
<b>Batedor</b>	1	2.65%	1.40%	0.39%	1.09%
<b>1/2 Canal</b>	2	0.95%	0.48%	0.86%	0.59%
	3	1.99%	1.13%	1.07%	0.81%
	4	2.78%	0.61%	0.07%	0.45%
<b>Junto á obra</b>	5	0.82%	0.42%	0.18%	1.33%
	6	0.75%	1.61%	0.91%	0.30%
	7	1.09%	1.07%	0.75%	0.39%

**Tabela 25 – Variação percentual da Análise Espectral Vs Análise Temporal para Tp=14s  
BM**

Zona	Sonda	Hs [m]				
		5.50	6.50	7.50	8.00	8.50
Batedor	1	3.28%	1.95%	2.30%	1.08%	1.63%
	2				7.34%	7.24%
1/2 Canal	3	2.42%	2.78%	2.35%	2.52%	1.48%
	4	0.86%	1.70%	1.07%	0.54%	0.30%
Junto á obra	5	1.24%	0.29%	1.05%	0.30%	2.17%
	6	3.23%	1.66%	0.45%	0.47%	1.26%
	7	2.55%	2.77%	2.19%	3.05%	0.63%

**Tabela 26 – Variação percentual da Análise Espectral Vs Análise Temporal para Tp=14s  
PM**

Zona	Sonda	Hs [m]					
		5.50	6.50	7.50	8.00	8.50	9.00
Batedor	1	3.06%	3.20%	3.17%	2.73%	2.54%	1.92%
1/2 Canal	2	2.41%	3.49%	2.69%	2.15%	2.50%	3.13%
	3	4.11%	2.14%	2.82%	1.38%	1.29%	0.59%
	4	2.29%	1.76%	1.94%	2.22%	1.41%	0.75%
Junto á obra	5	1.21%	0.61%	0.16%	1.27%	2.27%	2.31%
	6	1.87%	0.44%	0.36%	1.25%	2.01%	1.10%
	7	3.91%	3.63%	3.62%	2.54%	1.42%	1.10%

**Tabela 27 – Variação percentual da Análise Espectral Vs Análise Temporal para Tp=18s  
BM**

Zona	Sonda	Hs [m]	
		5.50	6.50
Batedor	1	1.68%	1.64%
1/2 Canal	2	3.61%	4.16%
	3	2.49%	2.84%
	4	1.32%	0.71%
Junto á obra	5	0.01%	0.64%
	6	1.57%	1.21%
	7	3.17%	2.43%

**Tabela 28 – Variação percentual da Análise Espectral Vs Análise Temporal para  $T_p=18s$   
PM**

Zona	Sonda	Hs [m]	
		5.50	6.50
<b>Batedor</b>	1	2.67%	2.47%
<b>1/2 Canal</b>	2	4.45%	4.60%
	3	3.29%	3.28%
	4	2.45%	1.21%
<b>Junto á obra</b>	5	1.95%	0.95%
	6	3.32%	2.22%
	7	5.24%	3.62%

## ANEXO 2 – PREIA-MAR VS BAIXA-MAR PARA ANÁLISE ESPETRAL

Tabela 29 – Variação percentual para Análise Espetral de PM vs BM para  $T_p=10s$

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	12.69%	4.57%	11.24%	1.71%	11.15%	1.82%
	2	11.44%	4.62%	8.08%	5.49%	8.78%	2.26%
1/2 Canal	3	0.25%	1.00%	1.57%	6.77%	1.81%	1.33%
	4	2.67%	4.12%	5.29%	2.90%	5.31%	1.60%
Junto á obra	5	0.42%	1.52%	1.15%	1.20%	1.00%	4.23%
	6	1.20%	6.97%	2.57%	3.03%	2.07%	7.78%
	7	3.10%	4.77%	2.07%	5.47%	2.91%	4.39%

Tabela 30 – Variação percentual para Análise Espetral de PM vs BM para  $T_p=14 s$   
(Hs=5.50 a 7.50)

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	3.98%	1.74%	2.26%	10.15%	6.20%	4.83%
	2						
1/2 Canal	3	1.34%	3.27%	2.77%	0.58%	3.40%	0.99%
	4	6.69%	0.46%	4.22%	1.59%	1.35%	0.22%
Junto á obra	5	7.40%	4.05%	5.27%	2.08%	2.80%	4.48%
	6	5.57%	5.12%	5.80%	0.74%	3.22%	3.45%
	7	2.12%	1.42%	0.49%	7.85%	1.63%	3.57%

**Tabela 31 – Variação percentual para Análise Espectral de PM Vs BM para Tp=14 s  
(Hs=8.00 a 8.50)**

Hs [m]		8.00		8.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	9.43%	3.37%	5.67%	1.92%
	2	1.57%	4.49%	4.04%	4.10%
1/2 Canal	3	1.45%	1.36%	0.98%	2.45%
	4	0.43%	0.27%	0.76%	0.67%
Junto á obra	5	0.96%	5.02%	3.23%	4.25%
	6	3.40%	0.18%	4.73%	0.69%
	7	2.22%	0.63%	1.89%	2.81%

**Tabela 32 – Variação percentual para Análise Espectral de PM Vs BM para Tp=18 s**

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	2.03%	3.88%	0.52%	2.96%
	2	2.27%	4.26%	1.40%	3.26%
1/2 Canal	3	2.30%	13.42%	0.38%	3.83%
	4	2.99%	3.43%	4.22%	3.08%
Junto á obra	5	0.53%	0.29%	2.47%	0.60%
	6	0.11%	0.30%	2.65%	2.64%
	7	0.65%	42.99%	0.70%	33.75%

## ANEXO 3 – PREIA-MAR VS BAIXA-MAR PARA ANÁLISE TEMPORAL

Tabela 33 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para Tp=10s

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	12.57%	0.41%	10.77%	0.29%	12.20%	0.60%
	2	11.65%	1.42%	8.71%	0.32%	9.83%	1.88%
1/2 Canal	3	1.37%	2.76%	2.34%	1.43%	0.95%	0.69%
	4	4.04%	2.93%	6.18%	0.58%	5.72%	1.37%
Junto á obra	5	0.17%	1.58%	3.46%	1.71%	1.97%	1.23%
	6	0.28%	3.56%	5.26%	2.37%	3.65%	2.16%
	7	3.40%	1.06%	4.12%	1.60%	2.78%	0.65%

Tabela 34 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para Tp=14s (Hs=5.5 a 7.5)

Hs [m]		5.50		6.50		7.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	3.76%	4.82%	3.52%	4.08%	7.09%	3.99%
	2						
1/2 Canal	3	0.30%	3.67%	3.37%	2.98%	3.88%	2.50%
	4	5.37%	3.72%	4.16%	3.88%	0.50%	2.77%
Junto á obra	5	7.43%	3.32%	4.96%	4.59%	1.92%	4.67%
	6	6.81%	3.28%	6.93%	3.80%	3.99%	2.08%
	7	0.83%	1.04%	0.35%	1.95%	3.05%	0.15%

**Tabela 35 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para Tp=14s  
(Hs=8.0 e 8.5)**

Hs [m]		8.00		8.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	11.21%	3.19%	6.62%	2.91%
	2	6.33%	2.73%	8.28%	3.45%
1/2 Canal	3	0.33%	1.96%	0.80%	2.22%
	4	1.24%	1.84%	0.95%	1.35%
Junto á obra	5	1.92%	2.85%	3.33%	3.04%
	6	5.05%	0.45%	5.45%	1.56%
	7	1.72%	0.14%	2.69%	1.21%

**Tabela 36 – Variação percentual para Análise Temporal de PM vs BM para Tp=18s**

Hs [m]		5.50		6.50	
Zona	Sonda	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
Batedor	1	3.03%	0.27%	1.33%	0.79%
1/2 Canal	2	3.10%	0.64%	0.98%	1.44%
	3	3.10%	1.40%	0.82%	0.99%
	4	1.92%	0.75%	3.75%	0.54%
Junto á obra	5	2.48%	0.74%	0.91%	1.43%
	6	1.60%	0.28%	1.67%	0.63%
	7	2.67%	0.69%	0.44%	1.40%

## ANEXO 4 – CONTAGEM DE MOVIMENTO E DE QUEDAS

Tabela 37 – Contagem de movimentos e quedas de PM para Tp=10s

PM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
10s	5.5	1	7	0.3%	4.0%	15	8.6%	0	0.0%
	6.5	1	7	0.3%	4.0%	5	2.9%	3	0.2%
	7.5	4	9	1.1%	5.1%	7	4.0%	3	0.2%
	8.0	1	5	0.3%	2.9%	3	1.7%	2	0.1%

Tabela 38 – Contagem de movimentos e quedas de BM para Tp=10s

BM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
10s	5.5	0	7	0.0%	4.0%	15	8.6%	5	0.4%
	6.5	0	4	0.0%	2.3%	5	2.9%	5	0.4%
	7.0	2	2	0.6%	1.1%	14	8.0%	8	0.6%
	7.5	1	2	0.3%	1.1%	4	2.3%	6	0.4%

Tabela 39 – Contagem de movimentos e quedas de PM para Tp=14s

PM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
14s	5.5	1	3	0.3%	1.7%	17	9.7%	23	1.7%
	6.5	0	1	0.0%	0.6%	4	2.3%	11	0.8%
	7.5	2	2	0.6%	1.1%	4	2.3%	8	0.6%
	8.0	2	4	0.6%	2.3%	8	4.6%	22	1.6%
	8.5	4	8	1.1%	4.6%	17	9.7%	21	1.6%
	9.0	3	6	0.9%	3.4%	17	9.7%	23	1.7%

**Tabela 40 – Contagem de movimentos e quedas de PM para Tp=14s**

BM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
14s	5.5	0	3	0.0%	1.7%	8	4.6%	7	0.5%
	6.5	0	4	0.0%	2.3%	5	2.9%	14	1.0%
	7.5	0	6	0.0%	3.4%	11	6.3%	18	1.3%
	8.0	1	4	0.3%	2.3%	28	16.0%	21	1.6%
	8.5	0	10	0.0%	5.7%	29	16.6%	0	0.0%

**Tabela 41 – Contagem de movimentos e quedas de PM para Tp=18s**

PM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
18s	5.5	0	1	0.0%	0.6%	15	8.6%	13	1.0%
	6.5	0	5	0.0%	2.9%	18	10.3%	23	1.7%

**Tabela 42 – Contagem de movimentos e quedas de BM para Tp=18s**

BM		Manto Resistente				Pé do Talude			
Tp	Hs	Tetrapodos				Enroc 60-90 kN		Enroc 10-40 kN	
		Quedas	Mov.	Quedas	Mov.	Quedas	Quedas	Quedas	Quedas
		Nº	Nº	(%)	(%)	Nº	(%)	Nº	(%)
18s	5.5	0	0	0.0%	0.0%	25	14.3%	16	1.2%
	6.5	0	4	0.0%	2.3%	13	7.4%	7	0.5%