

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Estudo da aplicabilidade do modelo numérico SWASH para o cálculo de galgamentos no Sistema HIDRALERTA

INÊS FORTE
(Licenciada em Engenharia Civil)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil na área de especialização de Hidráulica

Orientadores:

Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa
Vogais: Doutora Liliana Vieira Pinheiro
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Janeiro 2017

What we do in life, echoes in eternity.

(Scott, 2000)

Agradecimentos

O apoio recebido de tantas pessoas e de tantas partes do mundo tornou este trabalho um feito mais leve. A todos os que se cruzaram comigo durante este percurso, a vossa presença foi importante.

À minha mãe, a pessoa mais Forte que conheço, quem eu sempre quis que os seus olhos demonstrassem o orgulho que sentia em mim. Obrigada por todo o apoio ao longo da minha vida, da paciência, amor e ajuda na elaboração deste mesmo trabalho. Ao meu pai, homem sempre de poucas palavras, o meu obrigado por toda a ajuda. E porque sempre soube que, ... *eu sou do tamanho do que vejo, E não, do tamanho da minha altura...*

Ao resto da minha família e a todos os meus irmãos. Ao meu mano Pedro, por me desafiar continuamente, infernizando tudo o que eu dizia e assim provocando em mim uma crescente vontade de ser melhor em tudo. À minha mana Cristina. A pessoa mais trabalhadora deste mundo, quem sempre valorizou cada passinho que eu dei e me motivou a ir mais longe do que qualquer um. E Susana, que apesar de longe sei que sempre me apoiaste em tudo. A vocês, Avô, Titá, Suca e Teresa Ca.

Agradeço do coração aos meus amigos que me acompanharam com tanto carinho ao longo deste percurso, Tiago e Flávio, e ao Dário pela grande ajuda na reta final. Um muito especial às que mais me marcaram, obrigada pela vossa existência na minha vida, Solange e Andreia. A ti Diogo Filipe, a importância que tiveste neste percurso não cabe em tão poucas palavras. Partilhar os meus sucessos contigo engrandece-os. Obrigada por todo o apoio e noites em clara que passaste a meu lado.

Obrigada à Mitsuki, ao Veasna, às crianças e aos professores de New Bridge for Cambodia, por me abrirem os olhos ao mundo, que tanto me ajudaram a crescer e de quem eu sinto tanta falta.

Obrigada ao LNEC, ao programa HIDRALERTA e aos meus orientadores Eng^a Juana Fortes e Eng^o João Alfredo dos Santos, por todo o apoio que me ofereceram ao longo destes meses. Obrigada ainda ao Pedro Poseiro que tanta paciência e tempo me facultou.

Por último, obrigado a duas pessoas que me ajudaram na compreensão do programa e que se mostraram disponíveis desde o primeiro momento, Víctor Pés da Universidade Politécnica da Catalunha e Tomohiro Suzuki da Universidade de Ghent.

Resumo

O porto da Praia da Vitória é um dos maiores e mais importantes portos do Arquipélago dos Açores. A dimensão, a capacidade de receção de navios e a localização no centro dos Açores conferem ao porto uma grande relevância na economia. Deste ponto de vista, têm sido estudadas formas de proteção a zonas costeiras e portos para que situações de emergência possam ser atenuadas e previstas para segurança do porto e das populações.

Os modelos numéricos de previsão da agitação marítima proporcionam o conhecimento antecipado de possíveis tempestades e grandes agitações marítimas possibilitando prevenir atempadamente as populações e trabalhadores do porto e marina para os eventuais acontecimentos graves. Um destes modelos é o HIDRALERTA, criado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa.

Para os galgamentos em áreas portuárias que contenham estruturas marítimas, o HIDRALERTA utiliza a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Esta ferramenta fornece os valores do caudal médio galgado por unidade linear de estrutura, utilizando como dados as características físicas da estrutura bem como a agitação marítima nela incidente. É no entanto, uma ferramenta que não fornece informações sobre a área inundada atrás da estrutura marítima. Nesse sentido, o modelo numérico SWASH constitui uma alternativa ao NN_OVERTOPPING2, uma vez que não só é capaz de simular a propagação de ondas e o galgamento de estruturas mas também a área inundada.

O presente trabalho apresenta o estudo feito em torno do modelo numérico SWASH. Avalia-se o seu desempenho comparando os seus resultados, em termos de alturas de onda, caudal e volume galgado com medições efetuadas no modelo físico de um perfil do quebra-mar sul do porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores.

Concluiu-se que ainda é necessário aprofundar o estudo em volta do modelo. Os resultados obtidos são bastante distantes dos obtidos nos ensaios físicos, pelo que é necessário ajustar os ficheiros de dados. Devem ser analisadas as condições de reflexão e a aplicação de porosidade, que neste caso corresponde à camada de tetrápodes. No entanto foi possível criar ficheiros funcionais que possibilitaram as análises pretendidas.

Palavras-chave: Porto da Praia da Vitória, quebra-mar sul, SWASH, agitação, galgamento.

Abstract

The harbour of Praia da Vitória is one of the largest and most important harbours of the Azores Archipelago. The size, capacity for receiving ships and location in the center of the Azores, gives the port a great relevance in the economy. From this point of view, the protection of the harbour and bay of Praia da Vitória is a matter of study so that emergency situations can be reduced and forecast for the safety of the harbour and the populations.

As a form of protection there are programs of anticipation of sea agitation that provide the knowledge of possible storms and great maritime agitations in advance, so that it is possible to prevent the populations and workers of the harbour and marina for possible serious events. One of these programs is HIDRALERTA, a system created at the National Laboratory of Civil Engineering in Lisbon.

For overtopping over harbour areas containing marine structures, HIDRALERTA uses the NN_OVERTOPPING2 neural tool. This tool provides the values of the average flow rate per linear unit of structure, using as a data the maritime agitation incident on the structure as well as the physical characteristics of it. It is, however, a tool that does not provide information about the flooded area behind the maritime structure. In this sense, the SWASH numerical model is an alternative to NN_OVERTOPPING2, since it is a model that not only is able to simulate wave propagation, the overtopping over structures but also the flooded areas.

The present work presents a study made around the numerical model SWASH. The performance of this model is evaluated by comparing its results in terms of wave heights, flow rate and volume measured with measurements made in the physical model of the south breakwater profile of the harbour of Praia da Vitória, Terceira Island, Azores.

It was concluded that it is necessary to make a deeper study of the model. The results obtained were very distant from the ones gathered in the physical model, so it is necessary to adjust the inputs created. The reflection conditions and the application of the porosity layer must deeper analyzed. However, it was possible to create functional inputs that allowed the intended analysis.

Keywords: Praia da Vitória's harbour, south breakwater, SWASH, agitation, overtopping.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Índice de Gráficos.....	xvii
Lista de Abreviaturas	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos e Metodologia	3
1.3. Estrutura da tese	5
1.4. HIDRALERTA.....	5
2. MODELO NUMÉRICO SWASH.....	11
2.1. Introdução	11
2.2. Funcionamento e equações base	12
2.3. Dispersão de frequência	14
2.4. Discretização espacial e temporal	15
2.5. Condições iniciais, de fronteira e constantes impostas	18
2.5.1. Espectro de JONSWAP.....	20
2.6. Conservação de quantidade de movimento.....	20
2.7. Parâmetros físicos	21
2.8. Ficheiros de dados e de resultados	22
3. CASO DE ESTUDO.....	23
3.1. Porto da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores	23

3.2.	Estruturas marítimas.....	25
3.2.1.	Quebra-mar Norte	26
3.2.2.	Esporões e defesa frontal aderente	28
3.2.3.	Quebra-mar Sul.....	30
3.3.	Modelo físico	31
3.3.1.	Ensaaios em modelo reduzido.....	32
3.3.2.	Estrutura.....	32
3.3.3.	Equipamentos utilizados.....	34
3.3.4.	Testes realizados	36
3.3.5.	Resultados obtidos	38
4.	APLICAÇÃO DO MODELO SWASH.....	41
4.1.	Introdução	41
4.2.	Batimetria	42
4.3.	Discretização espacial e temporal	44
4.4.	Condições de fronteira.....	46
4.4.1.	Ondas regulares	46
4.4.2.	Ondas irregulares	46
4.5.	Parâmetros físicos e numéricos.....	47
4.6.	Camada porosa	49
4.7.	Galgamentos	50
4.8.	Ficheiros de resultados.....	51
5.	RESULTADOS E COMPARAÇÕES	55
5.1.	Introdução	55
5.2.	Análise da variação dos parâmetros característicos	56
5.2.1.	Ondas regulares	56
5.2.2.	Ondas irregulares	59

5.2.3. Aplicação da camada porosa.....	62
5.3. Caudal	75
5.4. Aplicação a outras condições de agitação	80
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	85
6.1. Conclusões gerais	85
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	86
7. BIBLIOGRAFIA.....	87
Anexo A: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas regulares com fundo impermeável	93
Anexo B: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável	95
Anexo C: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas irregulares com camada porosa	97
Anexo D: Valores dos parâmetros obtidos nos ensaios realizados em modelo físico para uma altura significativa de 8,5m e 14s	101

Índice de Figuras

Figura 1 - Sistema de funcionamento do sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2013).	7
Figura 2 - Malha vertical com K camadas. (Manual, Team 2015)	17
Figura 3 - Açores, Ilha Terceira, localização do Porto da Praia da Vitória.	23
Figura 4 - Estrada com ciclovia e um restaurante (Google Maps).	25
Figura 5 - Baía do porto da Praia da Vitória (Google Earth).	26
Figura 6 - Quebra-mar Norte após a tempestade à esquerda e após as reparações à direita. (Baird, 2010)	27
Figura 7 - Esporões da baía da Praia da Vitória. (adaptado de Google Maps).....	28
Figura 8 - Perfil do esporão 3 da baía da Praia da Vitória. (Neves, <i>et al</i> , 2012).	29
Figura 9 - Perfil da defesa frontal aderente da baía da Praia da Vitória. (Neves, <i>et al</i> , 2012).	29
Figura 10 - Quebra-mar Sul do Porto da Praia da Vitória. (Google Maps).....	30
Figura 11 - Dimensões do canal usado nos ensaios.	32
Figura 12 - Dimensões do modelo ao longo do canal.	33
Figura 13 - Pormenor da secção transversal do quebra-mar com respetivas dimensões e cotas.....	33
Figura 14 - Localização das sondas ao longo do canal.	35
Figura 15 - Estrutura com a balança após a rampa.....	35
Figura 16 - Distribuição dos tabuleiros após o coroamento.....	36
Figura 17 - Batimetria usada no SWASH.	42
Figura 18 - Pormenor do coroamento inserido no SWASH.	43
Figura 19 - Exemplo de como a batimetria pode ter uma dimensão diferente da grelha computacional.....	44
Figura 20 - Perfil considerando uma camada totalmente impermeável.	49
Figura 21 - Pormenor da definição da camada porosa.....	49
Figura 22 - Imagens da elevação da superfície livre obtidas através do programa Python.	52
Figura 23 - Localização dos pontos para medição do caudal.....	53
Figura 24 - "Parede" criada ao aplicar uma porosidade de 0.	64
Figura 25 - Variação da superfície livre ao longo do canal.....	78
Figura 26 - Variação da superfície livre em pormenor no coroamento.	79

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Numero de camadas, a utilizar em função de kd e respetivo erro.	17
Tabela 2 - Distância das sondas de medição à posição de repouso do batedor.	34
Tabela 3 - Ensaios realizados com cada combinação de parâmetros para a primeira série.	37
Tabela 4 - Ensaios realizados com cada combinação de parâmetros para a segunda série.	37
Tabela 5 - Parâmetros calculados através da aplicação em Python.	38
Tabela 6 - Erros entre os resultados dos ensaios e a aplicação do SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	62
Tabela 7 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,45.	68
Tabela 8 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,6.	71
Tabela 9 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,8.	74
Tabela 10 - Volume obtido ensaio em modelo físico.	76
Tabela 11 - Valores de caudais obtidos nas simulações em SWASH para as porosidades aplicadas de 0,45, 0,6 e 0,8.	77
Tabela 12 - Erros associados à comparação entre os resultados do SWASH e os obtidos em ensaios físicos para uma altura de 7,5m e 14s.	83
Tabela 13 - Caudais e volumes obtidos no SWASH para uma altura significativa de 7,5 m e um período de pico de 14 s.	83

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas regulares.	58
Gráfico 2 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas regulares.	58
Gráfico 3 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas regulares.	58
Gráfico 4 - Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas regulares.	58
Gráfico 5 - Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas regulares.	59
Gráfico 6 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas regulares.	59
Gráfico 7 – Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	60
Gráfico 8 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	60
Gráfico 9 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	61
Gráfico 10 - Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	61
Gráfico 11 - Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	61
Gráfico 12 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.	61
Gráfico 13 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	66
Gráfico 14 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	66
Gráfico - 15 Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	66
Gráfico - 16 Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	66
Gráfico - 17 Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	67
Gráfico 18 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.	67

Gráfico 19 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	69
Gráfico 20 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	69
Gráfico 21 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	69
Gráfico 22 - Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	69
Gráfico 23 - Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	70
Gráfico 24 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.	70
Gráfico 25 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	72
Gráfico 26 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	72
Gráfico 27 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	72
Gráfico 28 - Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	72
Gráfico 29 - Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	73
Gráfico 30 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.	73
Gráfico 31 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	81
Gráfico 32 - Valores de T_p obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	81
Gráfico 33 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	81
Gráfico 34 - Valores de $H_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	81
Gráfico 35 - Valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	82
Gráfico 36 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.	82

Lista de Abreviaturas

BDF - Backward Differentiation Formula

Hm0 - Altura de onda significativa

Hmáx – Altura da superfície livre máxima registada

Hmrs - Altura média quadrática

JONSWAP – Joint North Sea Wave Project

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NLSW - Nonlinear Shallow Waters

NN_OVERTOPPING2 - Overtopping Neural Network

nWaves – número de ondas que atravessam um dado ponto

SWAN – Simulating waves Nearshore

SWASH – Simulating Waves till Shore

TMA – Texel, MARSEN, ARSLOE (espectro de onda)

Tmáx – Período de onda máximo registado

TOT – Material de todo o tamanho

Tp - Período de pico de onda

TVD - Total Variation Diminishing

ZH – Zero Hidrográfico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O perigo e os danos causados por tempestades ao longo das costas são preocupações intemporais para países como Portugal, com largos quilómetros de costa. Zonas costeiras foram desde sempre pontos estratégicos a nível comercial. Portugal, devido à sua extensa área marítima, à sua localização e por se tratar de um ponto importante de passagem de rotas marítimas, desenvolveu o seu litoral de forma a dinamizar a sua economia. Desta forma, ao longo da costa e bem perto do mar, as urbanizações foram sempre crescendo, aumentando não só as construções de habitação como infraestruturas comerciais. Ainda nos dias de hoje é possível continuar a observar a crescente ocupação do litoral português, assim como a importância que as importações e exportações, por via marítima, têm na economia portuguesa.

Um estudo publicado em novembro de 2015 por Benjamin Strauss (Strauss, 2015) mostrou o perigo causado pelo crescente aumento do nível das águas do mar a nível global. Este aumento é devido ao aumento da temperatura média no planeta, causado principalmente pela emissão de gases poluentes. Neste estudo são apresentados os aumentos médios estimados do nível das águas do mar para diversos países, incluindo Portugal. Estima-se que em Lisboa, para um aumento de 1,5^o sofrerá um aumento de 2,9 m e para 4^o um aumento de 8,2 m. Estes dados são estimativas que podem ainda ser bastante alterados consoante as reduções conseguidas a nível global nas emissões de gases poluentes para a atmosfera.

Como forma de proteção destas zonas foram-se instalando estruturas de proteção costeira e portuária. Estas estruturas são dimensionadas para zonas específicas com determinadas intensidades de agitação marítima. Apesar de dimensionadas para proteger determinadas zonas, é sempre possível o galgamento das mesmas mas dentro de valores que não se tornem prejudiciais. Infelizmente algumas estruturas têm sido ineficientes, muito provavelmente por não terem sido dimensionados para a agitação marítima incidente atualmente, que se tem alterado devido ao aumento do nível médio das águas do mar.

A importância deste problema tem promovido o desenvolvimento de sistemas de previsão de temporais. Com estes sistemas, pretende-se obter uma previsão do estado de agitação marítima de forma a antecipar situações de perigo. Encontra-se em desenvolvimento no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Raposeiro *et al.*, 2010, Reis *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Rocha, 2012, Rocha *et al.*, 2013, Poseiro *et al.*, 2013) o sistema HIDRALERTA. Trata-se de um sistema de previsão da agitação marítima e dos seus efeitos (em termos de galgamentos e inundação) com capacidade de alerta em situações de emergência.

Este projeto pretende contribuir para um programa de gestão integrada e sustentada das zonas costeiras e portuárias. Tem a capacidade de reduzir o perigo infligido pelos galgamentos das estruturas, através de informação antecipada das possíveis ocorrências que possam ser prejudiciais à costa ou aos portos.

A sua metodologia consiste na avaliação do risco de galgamentos em estruturas marítimas e praias utilizando longas séries de dados de agitação marítima, obtidos através de modelos numéricos de previsão, e determinando os efeitos dessa agitação junto à costa. São calculados os galgamentos e inundações através de ferramentas neuronais, modelos numéricos e fórmulas empíricas. Conhecidos os valores de galgamentos é feita a avaliação de risco com base em limites estabelecidos para estes galgamentos definidos com base nas atividades existentes, tipo de estrutura galgada e respetiva consequência caso ocorram os galgamentos previstos.

Neste sistema, as características de agitação marítima são obtidas com os modelos numéricos SWAN (Booij *et al.*, 1999), DREAMS (Fortes, 2002) ou WW III (Tolman, 1999). Para zonas de praia, (com ou sem estruturas de proteção) os galgamentos são obtidos através de fórmulas empíricas, utilizando como dados as características da agitação marítima obtidas naqueles modelos numéricos. Para áreas portuárias utiliza-se a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005).

Este sistema é ainda um protótipo e encontra-se a ser desenvolvido e testado para o porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, nos Açores (Neves *et al.*, 2012b, Rocha, 2012, Rocha *et al.*, 2013, Poseiro, 2013) e para a zona de Lisboa e Vale do Tejo na Costa da Caparica.

Um aspeto ainda em estudo no sistema é referente à determinação dos galgamentos e das áreas inundáveis. Como referido, para áreas portuárias, este cálculo é feito através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, que calcula o caudal médio galgado por unidade linear da estrutura, considerando as características de agitação marítima incidente na estrutura e as características físicas dessa estrutura. Com base nesses valores e recorrendo a fórmulas empíricas para o cálculo da extensão do galgamento e a informação georreferenciada da zona atrás da estrutura, é feita uma estimativa da área inundada. Trata-se assim de uma forma aproximada de cálculo da área inundada.

No sentido de melhor quantificar o galgamento, a sua extensão e a área inundada atrás da estrutura e por conseguinte ser inserido no sistema HIDRALERTA, o modelo numérico SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) constitui uma alternativa ao NN_OVERTOPPING2, pois não só simula a propagação de ondas em águas pouco profundas como calcula o galgamento de estruturas e determina a área inundável.

Como qualquer modelo, a sua aplicação a casos reais requiere calibração dos seus parâmetros e a avaliação do seu desempenho.

1.2. Objetivos e Metodologia

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do modelo SWASH na simulação da propagação de ondas e do galgamento do quebra-mar sul do porto da Praia da Vitória da ilha Terceira, nos Açores.

Em detalhe, pretende-se com este estudo avaliar os caudais médios galgados por unidade de comprimento do coroamento do quebra-mar sul do porto e verificar a coerência dos resultados do modelo SWASH face aos obtidos em ensaios em modelo físico (em canal) realizados em laboratório (Poseiro *et al.* 2015).

De forma a verificar se o modelo numérico traduz, com algum rigor, os valores de galgamento no quebra-mar, primeiramente foi necessário comparar os seus resultados, em termos de alturas de onda significativa, relativamente aos obtidos nos ensaios em modelo físico.

Para tal seguiu-se a seguinte metodologia:

- Seleção das características da onda a propagar no modelo numérico. Os ensaios em modelo físico foram realizados utilizando ondas irregulares com diversos valores de altura de onda e de período, tendo sido utilizadas várias sondas de medição da elevação da superfície livre ao longo do canal até à estrutura. Para a aplicação do modelo SWASH, selecionaram-se os ensaios realizados para uma onda incidente de altura significativa de onda de 8,5 m e um período de pico de 12 s.
- Cálculos preliminares: Simulação numérica de uma onda regular de altura de 8,5 m e período de 12 s. Tal foi efetuado, pois conduz a um menor tempo de computação e permite estudar a influência de parâmetros físicos nos resultados do modelo numérico bem como aferir quais as melhores condições de aplicação do modelo (malha, condições de fronteira, esquemas numéricos, etc.).
- Cálculos numéricos: Simulação numérica de uma onda irregular com altura significativa de onda de 8,5 m e período de pico de 12 s. Estes cálculos foram feitos considerando:
 - Camada impermeável.
 - Aplicação da camada de tetrápodes existente no quebra-mar. A definição deste género de camadas no SWASH é feita através da imposição de uma nova camada em que é atribuído um valor de porosidade.
 - Avaliação dos valores de caudal galgado no quebra-mar e comparação com os obtidos nos ensaios.

É importante notar, desde já, que em estudos anteriores (Pés, 2013) e (Pèrez, 2014) se mostrou a incapacidade do SWASH para estimar o caudal total que ultrapassa uma estrutura. O caudal medido corresponde a volumes de água definidos na forma de ondas, não contando com água na forma de salpicos. Espera-se por isso obter valores de caudal inferiores aos medidos nos ensaios uma vez que estes foram obtidos através do volume total de água galgada.

1.3. Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo, é feita uma introdução geral ao trabalho, incluindo os seus objetivos, metodologias e a própria estrutura. É ainda descrito o sistema HIDRALERTA, onde se pretende aplicar os resultados deste mesmo trabalho.

No segundo capítulo, será apresentado o modelo computacional utilizado neste estudo. Descreve-se o modelo SWASH, a sua aplicabilidade, capacidades e forma de funcionamento.

O capítulo 3 caracteriza o local de estudo, o porto da Praia da Vitória na Ilha Terceira. Descreve-se o porto e o quebra-mar sul, que foi a estrutura simulada no SWASH. Neste ponto insere-se ainda uma descrição dos ensaios realizados em modelo reduzido do mesmo trecho do quebra-mar sul.

O capítulo 4 descreve como foram realizadas as simulações com o programa SWASH, que diferentes avaliações foram feitas, a construção dos diferentes ficheiros de dados necessários, que parâmetros foram estudados e como foram variados os valores dos mesmos para os diferentes testes realizados no programa.

No quinto capítulo são apresentados os resultados dos diferentes testes e feitas as respetivas comparações com os resultados dos ensaios correspondentes.

Por fim no sexto capítulo são feitas as considerações finais e conclusões relativas a este trabalho.

1.4. HIDRALERTA

Atualmente já existem diversos sistemas desenvolvidos e em desenvolvimento de previsão do estado de agitação. O perigo e danos causados por tempestades na costa promoveram o desenvolvimento deste tipo de sistemas.

Um desses sistemas é o projeto HIDRALERTA que se encontra a ser desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), (Raposeiro *et al.*, 2010, Reis *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Rocha, 2012, Rocha *et al.*, 2013, Poseiro *et al.*, 2013).

Este sistema faz parte de um programa de gestão integrada e sustentada das zonas costeiras e portuárias. O estado do mar em Portugal continental e ilhas tem posto em perigo infraestruturas e população com bastante frequência. Esta ferramenta tem a capacidade de reduzir este perigo através de informação antecipada das possíveis ocorrências que possam ser prejudiciais à costa.

Em primeiro lugar, esta previsão de situações de emergência, em tempo real, permitirá que as entidades competentes tomem as medidas necessárias para minimizar danos materiais envolvendo prejuízos económicos e ambientais, e evitar acidentes envolvendo pessoas.

Outro ponto essencial é que se trata também de uma ferramenta capaz de simular possíveis futuros cenários, considerando alterações climáticas, que ao longo do tempo têm contribuído para o aumento do nível médio da água do mar e assim uma maior ocorrência de tempestades. Permite ainda a realização de avaliações de risco associado e a criação de mapas de risco partindo de séries temporais longas de medições e previsões de agitação marítima, nível do mar e dos consequentes galgamentos e inundações, ou em caso de alterações climáticas a previsão de cenários pré-definidos.

Pretende-se que este sistema seja uma ferramenta amigável para o utilizador, capaz de:

- Prever em tempo real situações de emergência de galgamentos e inundações que ponham em risco a segurança de pessoas, bens ou atividades para que seja emitido o alerta pelas entidades competentes;
- Avaliação e construção de mapas de risco através da análise de longas séries temporais de medição e previsão da agitação marítima, galgamentos e inundações incluindo possíveis alterações climatéricas.

O esquema de funcionamento do HIDRALERTA divide-se em quatro módulos. Inicia-se no estudo das características da agitação marítima, segue-se o cálculo dos galgamento e respetiva inundação provocada, e sistema de alerta.

1. Características da agitação marítima;
2. Galgamento e inundação;
3. Avaliação de risco;
4. Sistema de alerta.

A Figura 2 mostra o esquema geral do seu funcionamento.



Figura 1 - Sistema de funcionamento do sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2013).

1. Características da agitação marítima

Estes dados podem ser obtidos tanto através de dados históricos, registos existentes para vários anos, ou através de previsão, estando disponíveis com 180 horas de antecedência com resultados de 3 em 3 horas. As características usadas são a altura significativa (H_s), o período de onda médio ou de pico (T_m ou T_p), e a direção média da onda (θ).

A determinação destes dados é feita recorrendo a modelos numéricos de geração e/ou propagação de ondas, escolhidos de acordo com a zona em estudo. Esta escolha depende das características da zona e dos fenómenos envolvidos.

2. Galgamento e Inundação

Este segundo módulo baseia-se na estimativa dos valores de galgamento e inundação em áreas costeiras e infraestruturas portuárias. Pretende-se determinar os valores de caudal médio galgado e as cotas de inundação de acordo com uma dada condição de agitação marítima e nível da água próximo das estruturas em estudo.

A estimativa do galgamento é feita através de uma ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Esta ferramenta foi criada no âmbito do projeto europeu CLASH (Coeveld *et al.*, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005). Esta ferramenta é usada para áreas portuárias com estruturas marítimas. Existem 700 redes neuronais artificiais com informação sobre a agitação marítima, nível da água e ainda geometria da estrutura. Estas redes fornecem estas informações à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 que por sua vez fornece estimativas de caudal galgado por unidade e comprimento do coroamento da estrutura em estudo. Para além dos valores de caudal, é possível obter também a caracterização estatística das previsões de caudal realizadas pelas redes neuronais artificiais.

3. Avaliação de Risco

Este terceiro módulo estuda o risco associado ao galgamento e inundação das zonas costeiras e portuárias, determinados no ponto anterior. É determinada a probabilidade de ocorrência de galgamentos que ultrapassam um limiar pré-estabelecido numa dada estrutura através da análise de longas séries temporais de registos ou de estimativas de caudais médios galgados nessa mesma zona. Depois são avaliadas as consequências de ultrapassagem do mesmo limiar tanto para a estrutura como para a área envolvente e construídos os mapas de risco da zona.

De forma a simplificar, esta avaliação é traduzida num grau de risco correspondente ao produto do grau da probabilidade de ocorrência pelo grau de consequências associadas às ocorrências de galgamento e inundação da zona.

$$\textit{Grau de risco} = \textit{Grau de probabilidade} \times \textit{Grau de consequência}$$

Para a avaliação de risco de galgamento e inundação de uma zona é seguido um procedimento definido com os seguintes pontos:

- Avaliação da utilização das zonas abrigadas por cada secção da estrutura em estudo e definição do impacto que o galgamento e inundação nessa zona podem ter na segurança de pessoas, atividades e infraestruturas;

- Definição de valores críticos de galgamento em cada secção da estrutura em estudo em função de informação local e de recomendações de Pullen *et al.* (2007).
- Avaliação do grau de consequências no caso de ocorrerem caudais acima dos limites estabelecidos. Pode ser feita de uma forma simples como proposto por Raposeiro *et al.* (2010) ou mais elaborada com base no trabalho de Poseiro *et al.* (2013b);
- Determinação do grau de probabilidade de ocorrência dos caudais limites em cada secção da estrutura.
- Avaliação do grau de risco.

É de grande importância que se faça a melhor caracterização possível da cada zona uma vez que as suas características, atividades e estruturas em volta têm grande peso no resultado do grau de risco.

4. Sistema de Alerta

O quarto e último módulo é o sistema de previsão e alerta. É feita a previsão de situações de emergência numa zona de interesse e criadas mensagens de alerta caso ocorra alguma dessas situações.

O sistema de alerta é composto por um componente de avaliação de dados e outro de interação com o utilizador.

A partir das análises efetuadas nos pontos anteriores, são definidos os valores de caudal galgado e de cota de inundação máximos, a partir dos quais se passa a ter uma situação de emergência, ou seja, que comprometa a segurança de pessoas, atividades e estruturas. Uma vez previstos valores superiores aos limites estabelecidos será então emitida uma mensagem de alerta às entidades responsáveis. Esta mensagem é enviada com vários resultados obtidos pelo componente de avaliação. São criados mapas, gráficos e relatórios com os valores esperados e marcação das zonas de risco.

Caso consiga mostrar-se a capacidade do modelo SWASH para estimar a agitação registada no porto da Praia da Vitória, assim como calcular os caudais que galgam as estruturas, pretende-se que seja implementado no sistema HIDRALERTA em conjunto com

o atualmente usado NN_OVERTOPPING2. Entrará no módulo relativo ao galgamento e inundações. Neste trabalho, o estudo é centrado apenas num trecho do quebra-mar sul do porto. No entanto, pretende-se que no sistema se aplique o SWASH a toda a baía, englobando as diversas estruturas que nela se encontrem, assim como as praias.

2. MODELO NUMÉRICO SWASH

2.1. Introdução

SWASH é um acrónimo para *Simulating WAVes till SHore*. É um modelo numérico criado na Universidade Técnica de Delft, localizada nos Países Baixos, através do trabalho de Zijlema *et al.* (2011).

Este programa é uma ferramenta numérica capaz de prever e simular o comportamento da agitação marítima numa zona costeira. Desta forma é possível estudar a agitação marítima e a influência que fatores como vento, transporte de sedimentos ou estruturas podem ter na mesma, e ainda o cálculo do galgamento em estruturas marítimas e praias. Fornece uma descrição geral do comportamento da elevação da superfície livre, desde águas profundas até águas pouco profundas como zonas de praia e em portos. É aplicável a águas costeiras, estuários, lagos e rios.

Este programa funciona através de um ficheiro de dados, onde são especificadas as características do local em estudo, batimetria, permeabilidade da estrutura, nível de maré, características das águas tais como densidade, viscosidade, entre outras. Este ficheiro é sempre acompanhado de ficheiros de apoio para leitura de alguns dados como batimetria, porosidade, fricção, entre outros. Dependendo do estudo em questão, pode não ser necessário definir porosidade ou fricção. No entanto a batimetria é sempre necessária à simulação, e a sua construção não é feita diretamente no ficheiro de dados lido pelo SWASH, mas num ficheiro de apoio ligado ao primeiro. São ainda especificadas as condições de agitação marítima a estudar, ondas regulares ou irregulares, períodos de onda e altura de onda, entre outras que o programa permite definir.

Neste trabalho foi utilizada a versão 3.14 do SWASH.

2.2. Funcionamento e equações base

Os modelos numéricos usados atualmente, para estudar a agitação marítima, a sua propagação e os seus efeitos na costa, dividem-se de forma geral em dois grupos, modelos estocásticos, e modelos determinísticos. Os modelos estocásticos simulam a agitação das ondas de forma probabilística, normalmente baseando-se em fórmulas empíricas calibradas por experiências laboratoriais ou dados reais. Os determinísticos produzem simulações com base nas leis de conservação de massa e de quantidade de movimento. Podem também incluir a utilização de fórmulas empíricas calibradas por dados laboratoriais ou reais.

O modelo SWASH é um modelo determinístico, não hidrostático de superfície livre. O seu funcionamento é baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW – Nonlinear Shallow Waters) incluindo um termo referente à pressão não hidrostática, que por sua vez advém da equação de Navier Stokes que compreende a conservação de massa e de quantidade de movimento.

As equações apresentadas de seguida referem-se a uma aplicação do modelo em 2D com coordenadas cartesianas em profundidade média. Foram apresentadas estas por ser uma forma simplificada e geral. O modelo pode ser aplicado em duas ou três dimensões e as suas coordenadas podem em vez de cartesianas, ser em coordenadas esféricas. As equações são as apresentadas de seguida:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

O parâmetro t representa o tempo, x e y estão localizados à superfície da água, o eixo z tem orientação vertical dirigido para cima, $\zeta(x,y,t)$ é a elevação da superfície medida a partir do nível de repouso, $d(x,y)$ é a profundidade da coluna líquida medida desde o nível de

repouso até ao fundo do mar, $h=\zeta+d$ é a profundidade total, $u(x,y,t)$ e $v(x,y,t)$ representam a velocidade do escoamento na direção x e y , respetivamente. O parâmetro $q(x,y,z,t)$ refere-se à pressão não hidrostática (normalizada pela densidade), g é a aceleração da gravidade, cf a rugosidade do fundo adimensional e por fim τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} e τ_{yy} representam os termos relativos à componente horizontal da turbulência. O integral do gradiente da pressão não hidrostática na coluna líquida, presente na equação 2 pode ser representado pela equação 4.

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta - d)}{\partial x} \quad (4)$$

Em que q_b representa a pressão hidrostática no fundo.

A precisão da dispersão de frequência para ondas curtas pode ser melhorada implementando o esquema de Keller-box. Introduzindo também a velocidade na direção z à superfície e no fundo tem-se então a próxima equação.

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (5)$$

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (6)$$

sendo w_s a velocidade na direção z na superfície livre e w_b no fundo.

A conservação local da massa é dada pela equação seguinte:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (7)$$

Há ainda a considerar a componente relativa ao coeficiente de rugosidade. Para ondas que se propaguem através de longas distâncias a rugosidade do fundo pode causar alterações significativas, mais notáveis quando a profundidade é pequenas. A rugosidade provoca perda de energia no escoamento e cria turbulência junto ao fundo.

Existem diversas expressões que traduzem o coeficiente de rugosidade do fundo. Aqui apresenta-se a usada para modelos baseados no coeficiente de rugosidade de Manning, representado por n na equação 8. (Manual, Team 2015).

$$c_f = \frac{n^2 g}{\sqrt[3]{h}} \quad (8)$$

Por fim os diferentes parâmetros usados no cálculo da turbulência são dados pelas equações 9, 10 e 11.

$$\tau_{xx} = 2v_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = v_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{yy} = 2v_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (11)$$

em que v_t representa a viscosidade turbulenta horizontal. (Zijlema *et al.* 2011)

2.3. Dispersão de frequência

As simulações no SWASH podem ser feitas para uma profundidade média ou através de diversas camadas, em que a grelha computacional é dividida, na vertical. A dispersão de frequência pode ser melhorada através desta divisão em diferentes camadas, ao contrário dos modelos Boussinesq em que se aumenta a ordem das derivadas dependentes. O SWASH utiliza a sua própria dispersão de frequência, dependendo do número de camadas impostas, através de uma aproximação da relação linear de dispersão, derivada do esquema de Keller-box, dada pela equação 12.

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (12)$$

Em que ω representa a frequência angular, g a aceleração da gravidade, k o número de onda e d a profundidade.

Para a utilização de apenas uma camada vertical, para profundidade média, a dispersão de frequência é dada pela equação 13.

$$\omega^2 = gk \frac{kd}{1 + \frac{1}{4}k^2d^2} \quad (13)$$

Para uma simulação com duas ou três camadas são utilizadas as equações 14 e 15 respetivamente.

$$\omega^2 = gk \frac{kd + \frac{1}{16}k^3d^3}{1 + \frac{3}{8}k^2d^2 + \frac{1}{256}k^4d^4} \quad (14)$$

$$\omega^2 = gk \frac{kd + \frac{5}{54}k^3d^3 + \frac{1}{1296}k^5d^5}{1 + \frac{5}{12}k^2d^2 + \frac{5}{432}k^4d^4 + \frac{1}{46656}k^6d^6} \quad (15)$$

Deste modo a aproximação da dispersão de frequências torna-se mais consistente com o modelo levando a resultados mais coerentes. A relação de dispersão no SWASH apenas é possível para uma, duas ou três camadas verticais.

2.4. Discretização espacial e temporal

Parte imprescindível dos dados inseridos no modelo é também a definição da discretização do tempo e do espaço na simulação. A discretização espacial depende essencialmente do caso em estudo e da área em volta da qual se pretende obter a simulação.

Como referido anteriormente podem ser utilizadas coordenadas cartesianas ou esféricas, definindo também a origem e orientação. Esta definição depende da batimetria construída,

da estrutura em estudo e do comprimento, ou área, antes e depois da mesma onde se pretenda estudar a agitação. Ou seja, o espaço a estudar tem de englobar todo o comprimento, ou área, da batimetria e a batimetria por sua vez terá a descrição da forma da estrutura ou praia e ainda o espaço em volta da mesma. Para além da região de interesse é sempre aconselhável alargar um pouco a grelha computacional, pelo menos dois comprimentos de onda, devido às condições de fronteira que terão de ser impostas. Para situações onde é necessário diminuir a reflexão criada por uma fronteira, pode ser imposta uma *Sponge layer* (Camada de esponja). Neste caso terá ainda de ser adicionado o respetivo comprimento. Pode ser imposta uma camada de esponja por cada fronteira. Não existe um limite definido para o comprimento da grelha espacial, mas tal tem implicações no tempo computacional.

O intervalo espacial é também definido no ficheiro de dados pelo utilizador. Para que a precisão seja a melhor possível deverá ser utilizado um número de pontos da malha por comprimento de onda associado ao período onde ocorre a ordenada mais alta do espectro do estado de agitação. Para ondas com $H/d \ll 1$, em que H representa a altura de onda, seja significativa ou média quadrática, e d a profundidade, devem ser adotados 50 pontos na malha por comprimento de onda. Para ondas maiores considera-se 100 pontos na malha por comprimento de onda.

A definição na vertical é feita estabelecendo um número de camadas, igual em todo o domínio. A escolha do número de camadas é especialmente sensível para dois tipos de aplicação do modelo SWASH: estudo de estruturas verticais ou de propagação de ondas. Para o primeiro caso aconselha-se o uso de pelo menos 10 camadas que podem ser igualmente espaçadas ou não. A espessura das camadas, h_k , pode ser definida de forma relativa ou absoluta em que, pelo menos, uma camada deve ser de forma relativa para que se garanta que a soma das espessuras seja igual à profundidade da água. Para casos em que a batimetria apresente grandes variações de profundidade, como em lagos ou fossas, é aconselhável a escolha de camadas de espessura fixa de forma a manter uma resolução vertical razoável ao longo de toda a batimetria. A Figura 1 mostra uma definição de uma malha vertical com k camadas.

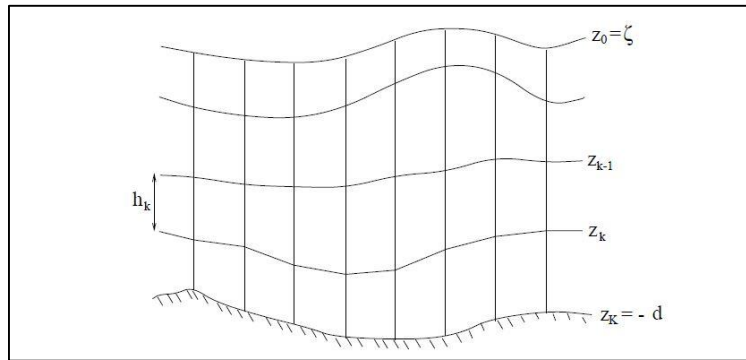


Figura 2 - Malha vertical com K camadas. (Manual, Team 2015)

É preciso ter em consideração que, quanto maior o número de camadas, maior será o tempo necessário para realizar as simulações.

Para a propagação de ondas, o número de camadas é definido pela dispersão linear da frequência. Dependendo da profundidade pode ser aplicada entre uma a três camadas. A Tabela 1 mostra o número de camadas a adotar dependendo dos limites e erros associados.

Tabela 1 - Numero de camadas, a utilizar em função de kd e respetivo erro.

K	Limite	Erro
1	$Kd \leq 0,5$	1%
1	$Kd \leq 2,9$	2%
2	$Kd \leq 7,7$	1%
3	$Kd \leq 16.4$	1%

O intervalo de tempo a simular depende do caso de estudo. Podem ser definidos apenas alguns minutos como várias horas. Para além da duração daquele intervalo, define-se também o passo de cálculo entre instantes em que serão calculadas as variáveis relevantes com o modelo. Parte da duração da simulação é utilizada para que se obtenha estabilização da mesma. Portanto, tal como para a grelha espacial, o tempo computacional também deve ser aumentado, neste caso entre 10% a 15% para acomodar a fase inicial de criação da

agitação marítima. Para uma correta simulação, é necessário ser considerado tempo suficiente para que ocorram entre 500 a 1000 ondas incidentes.

O modelo utiliza o número de Courant como critério de estabilização, que relaciona a velocidade do escoamento e a discretização espacial, sendo que em simulações 2D é dado pela Equação 16.

$$C_r = \Delta t \left(\sqrt{gd} + \sqrt{u^2 + v^2} \right) \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \leq 1 \quad (16)$$

em que C_r simboliza o número de Courant, as velocidades são dadas por u e v e os intervalos espaciais Δx e Δy . O acerto é feito de forma automática. São impostos no ficheiro de dados os valores mínimo e máximo do número de Courant. O intervalo Δt é diminuído para metade quando o valor de C_r é superior ao valor imposto como máximo (que é inferior a 1), e é duplicado quando C_r é menor que o valor imposto como mínimo. Este tem de ser pequeno o suficiente para que possa ser duplicado sem ultrapassar o limite máximo. O valor máximo aconselhado no manual é de 0,5.

Das poucas soluções apresentadas no manual sobre a resolução de problemas nas simulações, uma delas envolve o intervalo imposto no número de Courant. Se ocorrer um erro em que seja criada uma mensagem de erro, normalmente menciona apenas que a superfície livre das águas se encontra abaixo do mínimo permitido. Caso se verifique que o ficheiro de dados se encontra bem estruturado, o manual sugere a diminuição dos valores limites do número de Courant como forma mais simples e imediata de resolver o erro. Devem ser diminuídos os dois valores (mínimo e máximo), embora já não seja mencionado a grandeza dessa diminuição.

2.5. Condições iniciais, de fronteira e constantes impostas

Foram atribuídos valores constantes a alguns parâmetros como altura de água, velocidades, profundidade mínima admitida e a dimensão em que a simulação vai ser realizada (1D, 2D ou 3D).

Na definição da altura inicial é possível impor a altura relativa ao nível de maré. É definido em metros e por omissão é assumido o nível do zero hidrográfico. A profundidade mínima é imposta para que durante a simulação, caso algum ponto se encontre abaixo dessa profundidade, será retirado do cálculo. Por omissão é definida uma profundidade mínima de 0,00005 m. A dimensão da simulação é um fator que se mantém constante, não existem variações ao longo de uma simulação. A definição da dimensão no SWASH não é literal ao que consideramos como 1D ou 2D. Na verdade 1D tem duas dimensões, x e y mas apenas se pode definir a criação de ondas numa direção. 2D permite definir em duas direções, mas tem três coordenadas, x, y e z. 3D é realmente uma simulação em 3D mas entra com fatores extra como o transporte de sedimentos ou influência de temperatura. Portanto na verdade o SWASH permite simulações em 2D e 3D. Este trabalho trata apenas simulações em 2D, tem coordenadas em x e y, que na linguagem do SWASH se trata de uma simulação 1D.

As condições iniciais têm sempre grande influência na simulação, uma vez que definem como esta será iniciada, mas têm maior incidência para simulações de curta duração. As condições de fronteira ganham maior importância em simulações de maior dimensão temporal, ou seja, com maior tempo de simulação.

As fronteiras possíveis de definir no SWASH são apenas de três tipo, água, praia ou estruturas e as ondas podem ser geradas a partir de uma ou duas fronteiras. As ondas geradas podem ser regulares, através de séries de Fourier ou de séries temporais, irregulares unidirecionais ou irregulares multidirecionais. Dentro das irregulares é possível definir espectro de Pierson-Moskowitz, JONSWAP e TMA com dispersão direcional. JONSWAP é uma versão do espectro de Pierson-Moskowitz e TMA é um espectro modificado a partir do JONSWAP. É também possível definir as condições de agitação utilizando um ficheiro proveniente do modelo SWAN.

Dependendo das fronteiras impostas pode ser necessário definir condições de baixa reflexão de forma a melhorar o início da agitação ao longo do domínio definido. No caso de se gerar ondas a partir de uma única fronteira a segunda será por omissão, definida como uma fronteira fechada e irá refletir a ondas que aí cheguem. De forma a traduzir melhor o comportamento, uma vez que na realidade a segunda fronteira raramente será uma parede totalmente impermeável, é necessário adicionar uma condição que a torne pouco refletiva. Uma hipótese é aplicar uma condição de fronteira do tipo esponja, de forma a absorver a energia das ondas que eventualmente se propaguem no sentido da saída do domínio.

2.5.1. Espectro de JONSWAP

JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) é um espectro empírico, que define a distribuição com a frequência da densidade de energia no oceano. Este espectro é uma versão limitada do espectro Pierson-Moskowitz. Este segundo é também um espectro empírico onde se assume que se o vento atuar uniformemente durante um longo período de tempo sobre uma grande área, as ondas formadas atingem um ponto de equilíbrio com o vento obtendo-se o completo desenvolvimento.

No espectro JONSWAP, a onda nunca se desenvolve por completo, pelo que poderá continuar a desenvolver-se durante bastante tempo devido à interação entre ondas não-lineares. Assim no espectro JONSWAP, as ondas podem continuar a crescer de acordo com a distância ou o tempo, conforme especificado por um termo α (alfa). O espectro JONSWAP traduz o espectro de Pierson-Moskowitz multiplicado por um fator de pico, γ (gama). O pico do espectro é mais pronunciado, definido pelo termo γ . Hasselmann (1966) descobriu que este segundo termo é especialmente importante uma vez que conduz a interações não-lineares melhoradas.

O valor de α é uma constante que relaciona a velocidade do vento com o comprimento da zona onde o vento sopra, na direção do vento, o chamado *fetch*. Para o Mar do Norte são usados valores dentro de um intervalo que vai de 0,0081 a 0,01.

O valor de γ pode ir de 1 a 3,3. No SWASH, por omissão no ficheiro de dados, é usado o valor de maior pico, 3,3.

2.6. Conservação de quantidade de movimento

Para simulações de rebentação de ondas ou ressaltos hidráulicos é de grande importância a conservação da quantidade de movimento. Esta propriedade pode ser suficiente para que as soluções se tornem aceitáveis em relação a perdas de energia, localização do início da rebentação ou velocidade de propagação. Para a aplicação da conservação da quantidade de movimento, o SWASH tem disponíveis três esquemas numéricos. Tem um esquema padrão de primeira ordem, esquemas de ordem superior, obtidos através de uma formulação de k , e por fim um esquema TVD, *Total Variation Diminishing*. O valor de k pode ter valores entre -1 e 1 e define o tipo de esquema de ordem superior a ser utilizado. O

esquema TVD deverá ser aplicado quando ocorrerem simulações que incluam a influência de salinidade, temperatura ou transporte de sedimentos.

A opção admitida por omissão, é a aplicação de um esquema de conservação de quantidade de movimento BDF, *Second Order Backward Difference*. É um esquema de segunda ordem com $k = -1$ para os termos de advecção horizontal e de primeira ordem para os termos verticais nas equações de quantidade de movimento. Caso não seja descrito nenhum comando no ficheiro de dados relativamente à conservação de quantidade de movimento, o SWASH define se será aplicada a conservação da quantidade de movimento ou de energia. A conservação de energia apenas será aplicada a escoamentos onde ocorram elevadas contrações, caso contrário é aplicada a conservação da quantidade de movimento.

2.7. Parâmetros físicos

O modelo SWASH tem capacidade para integrar diversos parâmetros físicos que normalmente influenciam a propagação de ondas. É possível integrar o atrito no fundo, utilizando valores constantes ou variáveis ao longo do domínio, a viscosidade dos fluidos, vertical e horizontal, a existência de vegetação, o transporte de partículas ou a influência do vento à superfície. A consideração do vento só deverá ser feita para estudos de larga escala, excluindo propagação em portos e praias.

O atrito de fundo só será contabilizado se imposto no ficheiro de dados. Existem quatro opções para a definição do atrito de fundo, podendo ser utilizado um valor constante ou uma formulação de Chezy ou de Manning para cálculos em profundidades médias. Nestes casos podem ocorrer algumas inconsistências quando a velocidade média é nula. Neste caso pode ser adotada a quarta opção, a lei da parede logarítmica, onde terá de ser feita a distinção entre fundos lisos e rugosos. Se não for definido um comando para o atrito de fundo, então não será considerada qualquer atrito no fundo. Se o atrito for definido sem ser especificada uma das quatro opções anteriores, por omissão é considerada uma formulação de Manning com o valor de $0,019 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

O comando da viscosidade tem como função ativar a turbulência no escoamento. Esta é dividida em horizontal e vertical, em que a horizontal pode ser definida através de três

opções, um valor constante, o modelo de Smagorinsky ou o de Prandtl. A vertical tem apenas uma opção em que se define o modelo $k - \epsilon$, respetivamente turbulência por unidade de massa e grau de dissipação de turbulência. O valor recomendado pelo manual é de $0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$.

As opções de transporte e vegetação permitem definir as dimensões de partículas passíveis de serem transportadas assim como da vegetação presente no fundo. O fator de transporte de sedimentos, apenas é aplicável quando se inclui no ficheiro de dados referências à temperatura, salinidade e materiais suspensos.

2.8. Ficheiros de dados e de resultados

O SWASH trabalha com ficheiros de blocos de notas, ficheiros da aplicação *NotePad* para Windows. São ficheiros de edição de texto e são usados tanto para os dados como para os ficheiros de apoio. O ficheiro de dados gerais do problema tem uma extensão “.sws”, é aqui que são definidos todos os comandos de entrada, definição de agitação, definições espaciais e temporais, e ainda extensões para a leitura de outros ficheiros. O ficheiro da batimetria tem de ser diferenciado com a extensão “.bot” e é lido através de duas linhas de comando inseridas no ficheiro de dados. Uma para a definição da própria grelha da batimetria, e uma para a leitura do ficheiro. É possível acrescentar vários ficheiros de apoio, por exemplo para leitura de porosidade ou da rugosidade, que para serem incluídos na simulação devem sempre ser referenciados no ficheiro de dados e ser acompanhados da sua própria grelha computacional.

No mesmo ficheiro de dados do problema, definem-se também os resultados a extrair da simulação. É possível definir os resultados que se pretendem relativos à variação da superfície livre, velocidades, alturas de onda significativas, galgamentos e muitos mais. É possível definir o intervalo de tempo em que se pretende obter os valores de resultados e definir se se pretende a variação ao longo de toda a extensão da grelha ou em pontos isolados.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Porto da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores

O caso de estudo, o Porto da Praia da Vitória, é uma zona portuária situada na ilha Terceira que pertence ao grupo central da Região Autónoma dos Açores, Portugal. A ilha localiza-se no oceano Atlântico, a cerca de 1550 km de Lisboa e tem um comprimento de aproximadamente 29 km. A Praia da Vitória situa-se na zona leste da ilha e possui o maior porto da Ilha Terceira e dos mais importantes a nível económico do arquipélago. A Figura 3 mostra a localização da ilha relativamente a Portugal continental e a localização do porto.



Figura 3 - Açores, Ilha Terceira, localização do Porto da Praia da Vitória.

O Porto da Praia da Vitória é a maior estrutura portuária dos Açores e no que se refere à movimentação de navios, sendo a segunda maior no que se refere a mercadorias, precedida pelo de Ponta Delgada. Tem movimentações de navios de granéis líquidos e sólidos, de passageiros e de carga geral e é uma plataforma de ligação de navios e passageiros entre ilhas no arquipélago. Trata ainda da distribuição de mercadorias entre as ilhas do grupo central.

Este porto tem vários cais e estruturas de atracagem com capacidade de manobra de trabalho e de abastecimento de bens como água, eletricidade e combustível. Tem ainda três terminais concessionados a operações especiais, tais como um terminal cimenteiro que opera através de um pontão para o abastecimento de até dois silos de 3500 toneladas cada, onde podem atracar navios até 110 m o fundo à cota -7 m (Z.H.) recorrendo a dois duques d'Alba. Tem ainda um terminal de trasfega para o parque de combustíveis da ilha, situado a sul da estrutura portuária e um terminal para o tráfego de mercadorias que não sejam contentorizadas.

A oeste da estrutura comercial, graças ao abrigo que a mesma proporciona, existe ainda um núcleo de pesca, com 575 m de cais com fundos às cotas -6 m e -4 m (Z.H.). Tem espaços de estacionamento, passadiços, rampa de varadouro para limpeza de embarcações artesanais e estruturas para reparações navais com um elevador de navios com 450 toneladas de capacidade.

Segundo os últimos Censos, a ilha Terceira apresentava em 2011 uma população de 56.062 habitantes, sendo a segunda ilha mais populosa do arquipélago. Deste total de habitantes, na Praia da Vitória apenas se encontravam 21.086 habitantes. Este número foi recentemente reduzido devido à ordem estadunidense de retirada de cerca de 500 militares e respetivas famílias da Base das Lajes. A Base das Lajes, inaugurada como aeródromo da Achada em 1930, para além de ter influenciado o aumento populacional na ilha, provocou também um grande crescimento relativamente ao número de construções, entre estas o porto da Praia da Vitória.

A baía é circundada por uma estrada nacional, em que quase 2 km são feitos a escassos metros do mar. Esta estrada é acompanhada de uma ciclovia situada entre a estrada e o mar e de uma barreira de proteção para dissipação da energia das ondas aí incidentes.

É possível encontrar junto à estrada várias edificações como um hotel, um restaurante/bar e várias habitações, algumas a menos de 40 m da linha de água.

A Figura 4 mostra um restaurante situado mesmo à beira da defesa frontal aderente.

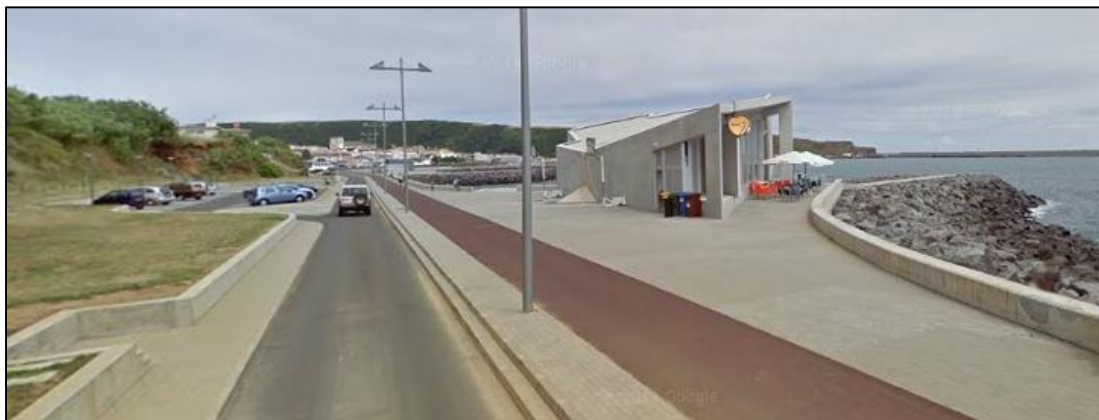


Figura 4 - Estrada com ciclovia e um restaurante (Google Maps).

Na zona norte da baía existe uma marina de recreio com capacidade para 210 amarrações. Existe ainda alguns serviços com restaurante, lojas e apoio a tripulantes. Desde a marina à zona sul da baía existem praias balneares separadas por esporões, onde devido ao abrigo oferecido pelos quebra-mares é frequente a prática de desportos aquáticos.

3.2. Estruturas marítimas

Na baía existem oito estruturas marítimas de proteção. As duas principais são os dois quebra-mares de proteção um a Norte com 560 m de comprimento e um a Sul com 1300 m. O primeiro molhe a ser construído foi o quebra-mar Norte nos anos 60. O segundo quebra-mar foi implantado apenas nos anos 80 oferecendo maior proteção ao porto.

Ao longo da linha de costa no interior da baía existem ainda 5 esporões, separados por praias, cada um com um comprimento diferente mas alinhados na mesma direção Oés-sudoeste – Lés-nordeste. Os esporões foram construídos na década de setenta tendo já sido reabilitados em 2007.

Na Figura 5 é possível visualizar toda a baía e estruturas referidas.



Figura 5 – Baía do porto da Praia da Vitória (Google Earth).

3.2.1. Quebra-mar Norte

A construção do quebra-mar norte é da responsabilidade da Força Aérea dos Estados Unidos da América. Foi construído em 1961 com o propósito de proteger a zona a norte da baía, na altura uma base militar e ponto de abastecimento para a base aérea das Lajes, da agitação marítima vinda do oceano Atlântico. Foi usada pedra de pedreiras locais com pesos entre 5 e 9 toneladas e de 9 a 13 toneladas no talude com uma inclinação de 2:1. Durante a construção, relatórios demonstraram que a pedra usada não aguentaria a agitação existente pelo que foi alterado para blocos tetrápodes de 15 toneladas. Apesar da alteração, a estrutura foi sofrendo grande degradação ao longo dos anos. Em retrospectiva, este acontecimento seria previsível. No entanto, na altura da construção, a capacidade de previsão da agitação marítima e tempestades era ainda limitada, pelo que o quebra-mar foi subdimensionado para as solicitações que foi sofrendo.

Em Dezembro de 2001, o porto foi afetado por uma grande tempestade que provocou graves danos na estrutura ameaçando o cais de descargas de combustível e as condutas que faziam a ligação do cais à base das Lajes. Não só devido à falha na proteção da baía mas também devido à elevada importância deste local a nível militar, foram levadas a cabo reparações de emergência. Foram feitas várias intervenções. Por ter sido durante o inverno, na primeira fase as reparações foram feitas o mais depressa possível e com os materiais que ali dispunham. Foi criada uma nova camada base de enrocamento e colocados cubos Antifer de 20 toneladas ao longo do talude. Como esperado, esta solução não durou muito e em 2003 sofreu novas intervenções para uma nova solução a longo prazo. Foi decidido que a melhor solução para manter a estrutura estável de acordo com as solicitações sofridas foi substituir os cubos Antifer por blocos CORE LOC de 33 toneladas. Foi reconstruída a berma de proteção em torno da cabeça usando enrocamento de 8 a 22 toneladas, reperfilado o corpo do quebra-mar e construído o manto de proteção do tardoz com a aplicação de enrocamento de 2,5 a 8 toneladas. Aplicados os blocos CORE LOC e feita a betonagem da superestrutura da cabeça foi ainda colocado um farol para apoio à navegação. As obras foram concluídas em Março de 2009.



Figura 6 - Quebra-mar Norte após a tempestade à esquerda e após as reparações à direita.
(Baird, 2010)

A Figura 6 mostra o quebra-mar norte após a tempestade de Dezembro de 2001 à esquerda e à direita o mesmo quebra-mar após as reparações concluídas em 2009.

3.2.2. Esporões e defesa frontal aderente

A construção dos dois quebra-mares aumentou a proteção da baía em relação à agitação marítima. Por outro lado, eles vieram alterar o regime de transporte de sólidos nas praias localizadas no interior da mesma. As ondas tendem a transportar as areias para zonas mais abrigadas deixando a zona central sem areal e mais desabrigada da ondulação incidente. De forma a evitar a erosão da zona central da baía, nos anos setenta foram construídos cinco esporões com uma defesa frontal aderente entre eles. Na Figura 7 é possível ver a localização de cada um.



Figura 7 - Esporões da baía da Praia da Vitória. (adaptado de Google Maps)

Com o tempo, também os esporões foram sofrendo alguma degradação. Em 2007, com o objetivo de ampliar a marginal e repor parte da areia levada das praias, os esporões foram todos reabilitados sofrendo ainda um aumento de comprimento. Os esporões 1 e 2 passaram a ter 45 m, os esporões 3 e 4 ficaram com 80 m e o esporão 5 ficou com 120 m. As praias foram enchidas com areia de uma área de empréstimo do centro da baía.

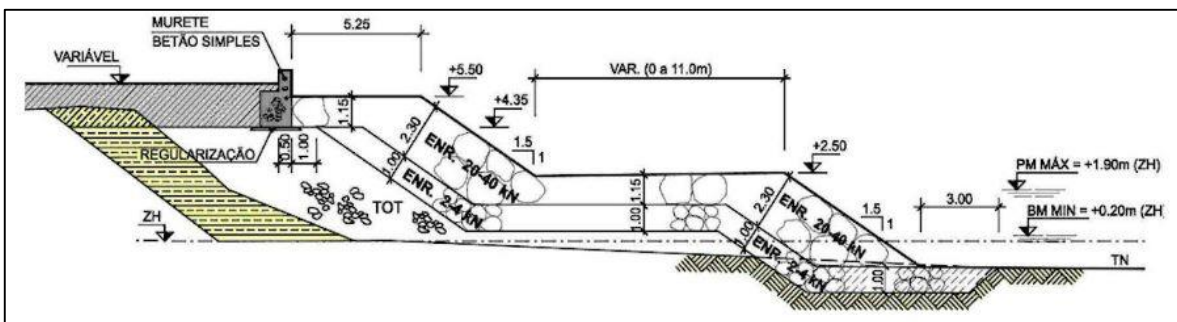


Figura 8 - Perfil do esporão 3 da baía da Praia da Vitória. (Neves, *et al*, 2012).

A Figura 8 representa metade do perfil do esporão, uma vez que a outra metade é simétrica. Como a figura mostra, os esporões foram construídos com duas camadas de enrocamento, dois taludes de igual inclinação separados por uma banqueteta, um murete de betão simples e com núcleo de TOT.

A defesa frontal aderente foi contruída com uma solução bastante semelhante aos esporões. Tem duas camadas de enrocamento, núcleo de TOT e um murete em betão simples. Tem apenas um talude, com a mesma inclinação que os dos esporões de 1,5:1 com o ponto mais alto a +5,50 m. O seu ponto mais baixo fica inferior ao nível de zero hidrográfico.

A Figura 9 mostra o perfil transversal tipo da defesa aderente.

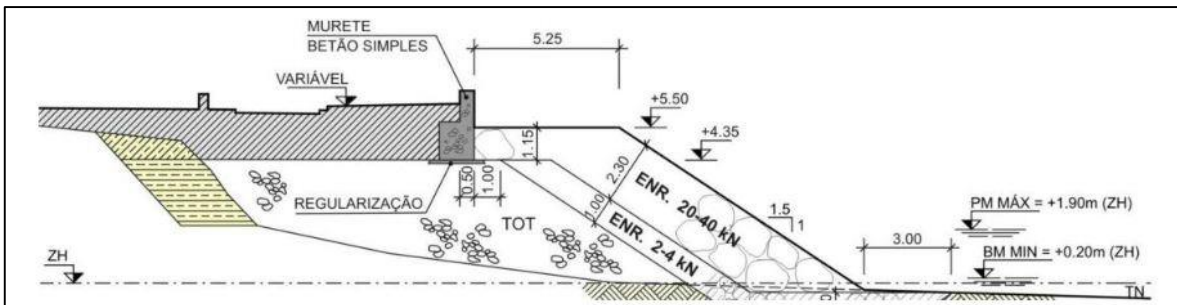


Figura 9 - Perfil da defesa frontal aderente da baía da Praia da Vitória. (Neves, *et al*, 2012).

3.2.3. Quebra-mar Sul

O quebra-mar Sul de proteção ao porto da Praia da Vitória foi concluído em 1989. Tem cerca de 1300 m de comprimento e a constituição do corpo era dividida em dois troços. Os primeiros 120 m possuíam um manto resistente com duas camadas de enrocamento de 120 a 150 kN. O coroamento encontrava-se à cota +6,9 m (ZH) e o manto de proteção foi colocado sobre um tapete de enrocamento de 10 a 20 kN. O segundo troço do corpo era protegido por tetrápodes de 300 kN apoiado numa banqueteta à cota -9,8 m (ZH) com 5 m de largura formada por blocos de enrocamento de 60 a 90 kN. O coroamento do manto resistente tinha como cota +8,6 m (ZH). Por fim o perfil de rotação da cabeça da estrutura era protegido por cubos Antifer de 330 kN.

Este quebra-mar protege o porto de pesca e uma das áreas de maior importância no interior da baía, o cais 12. É neste cais que é feita a ancoragem de navios de mercadorias para a carga e descarga das mesmas. Na Figura 10 é possível visualizar todo o quebra-mar, incluindo o cais 12, situado do lado esquerdo do quebra-mar.

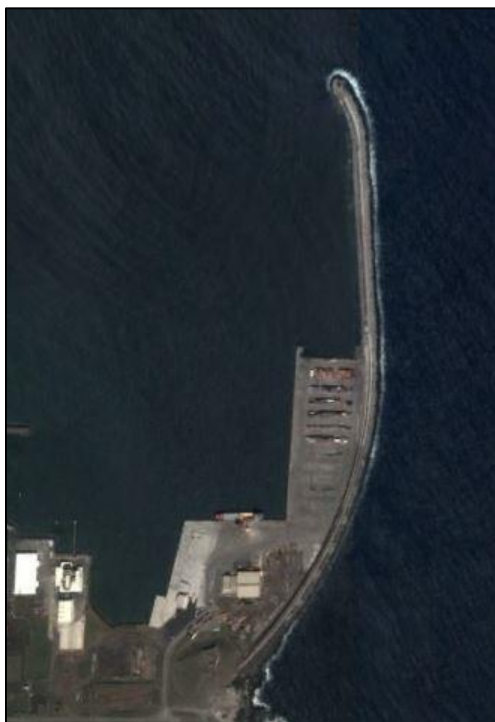


Figura 10 - Quebra-mar Sul do Porto da Praia da Vitória. (Google Maps)

Após um temporal que ocorreu entre 20 e 26 de Dezembro de 2001, grande parte do manto resistente e cerca de 200 m do muro-cortina foram destruídos. Foram então iniciados trabalhos de emergência de forma a evitar o colapso total do muro-cortina que poderia ter graves consequências no terrapleno portuário.

A 27 de Fevereiro de 2005 houve uma nova tempestade de grande intensidade que provocou novos danos na estrutura. Esta tempestade durou perto de 19 horas e foram registadas ondas com alturas de 15 m ao largo da baía.

Segundo o relatório sobre a observação sistemática de obras marítimas da região autónoma dos Açores realizado em 2011, por investigadores do LNEC, considera-se atualmente que a estrutura se encontra em bom estado, devendo ser vigiada e observada após a ocorrência de tempestades que proporcionem o galgamento da mesma. No entanto, é necessário ter em conta que não voltaram a ocorrer tempestades da mesma magnitude das que provocaram as últimas destruições, pelo que não se sabe ao certo se a estrutura atual resistirá a um acontecimento semelhante.

3.3. Modelo físico

Os ensaios de modelos realizados em laboratório são ferramentas utilizadas em vários ramos da Engenharia. Criam-se réplicas, normalmente com uma escala adequada, onde é possível estudar a resposta da estrutura a diversos fenómenos físicos como aplicação de cargas, ventos, terramotos ou agitação marítima a incidir numa estrutura. Estes modelos são utilizados por traduzirem uma aproximação à realidade na modelação deste tipo de fenómenos, que muitas vezes não são bem traduzidos por fórmulas matemáticas ou modelos numéricos. Para além disso, proporcionam uma visualização direta dos fenómenos em estudo, embora em diferentes escalas. A realização destes modelos, uma vez que são estudados através de réplicas reduzidas dos protótipos, implicam normalmente a ocorrência de erros nos seus resultados. Estes podem estar associados a diversos fatores como erros em medições, efeitos de escala, materiais utilizados que não correspondam corretamente ao material do protótipo, ou falhas nos aparelhos de medição. Um dos maiores inconvenientes da utilização de modelos físicos é muitas vezes o espaço necessário para a construção do modelo, as despesas implicadas e o tempo necessário não só para a sua realização como para o tratamento de dados e validação.

3.3.1. Ensaio em modelo reduzido

Pretendeu-se com este estudo analisar o espraiamento e o galgamento do perfil do trecho de quebra-mar que protege o cais 12 do porto da Praia da Vitória, para diferentes condições de agitação incidente. Os ensaios foram realizados no LNEC, no seu pavilhão de Hidráulica Marítima, (Poseiro *et al.* 2015).

Foi usado um canal de geometria retangular com dimensões exteriores de 50 m de comprimento, 1,95 m de largura e 1,20 m de altura. As suas dimensões interiores são 49,60 m de comprimento e 1,60 m de largura sendo habitualmente utilizada apenas metade da largura do canal.

A Figura 11 mostra as dimensões em planta.

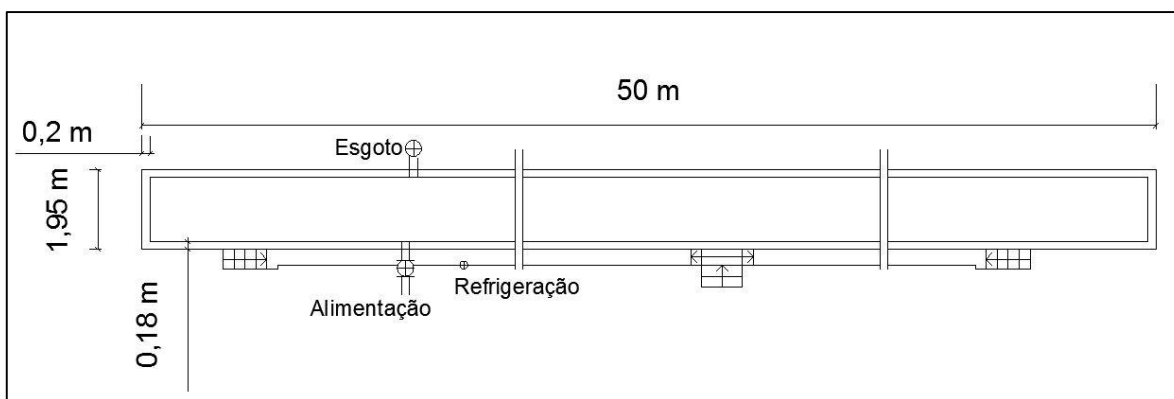


Figura 11 - Dimensões do canal usado nos ensaios.

3.3.2. Estrutura

Foi implementado no canal uma secção do quebra-mar sul do porto da Praia da Vitória. O modelo foi reproduzido à escala 1:48.

O modelo foi construído com um total de 34 m de comprimento, incluindo a representação do fundo que condiciona a propagação da agitação marítima até ao local de implantação do quebra-mar. Iniciou-se com 21 m em plano horizontal. Após esses 21 m iniciou-se o desenvolvimento da estrutura com 11,55 m de comprimento e uma inclinação de 1:39. Este primeiro trecho é impermeável. Os trechos seguintes já representam a secção transversal

do quebra-mar, com uma camada base impermeável sob uma permeável. Existem três trechos com esta constituição. No primeiro trecho a camada permeável é de enrocamento com 80,21 cm de comprimento e uma inclinação de 1:4 e no segundo a camada é composta por tetrápodes com 57,08 cm de comprimento e uma inclinação de 2:3 seguido de um trecho com 16,78 cm de comprimento na horizontal. Seguem-se dois treços horizontais a uma cota mais baixa, a primeira impermeável com 10,42 cm de comprimento e a segunda permeável com 6,25 cm.

As Figuras 12 e 13 mostram, respetivamente, o desenvolvimento da estrutura no canal, após os 21 m de fundo horizontal e um pormenor da estrutura com as distâncias referidas anteriormente.

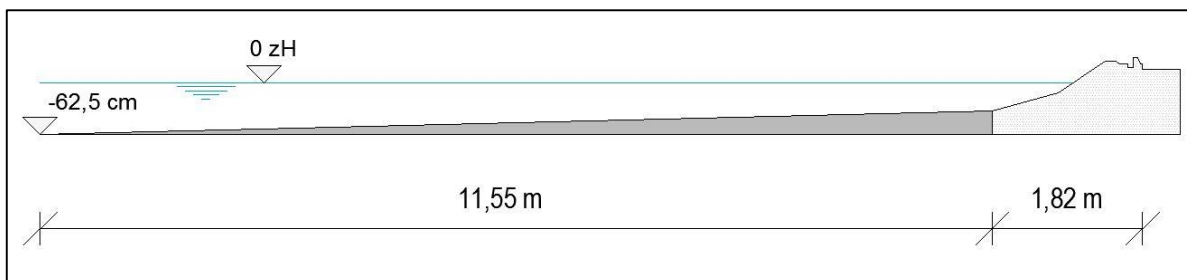


Figura 12 - Dimensões do modelo ao longo do canal.

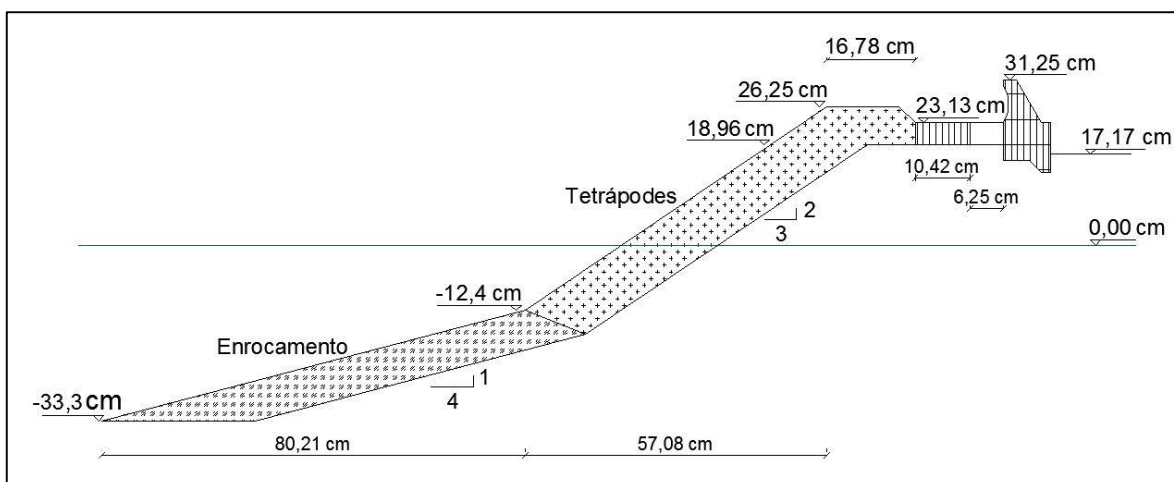


Figura 13 - Pormenor da secção transversal do quebra-mar com respetivas dimensões e cotas.

3.3.3. Equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios foram utilizados vários equipamentos de medição instalados em diversos pontos do canal: 12 sondas ao longo do canal, para medição da elevação da superfície livre, e uma balança, após o coroamento da estrutura, para medição do volume de água galgado. Na aquisição de dados foram usados computadores para a recepção e armazenamento dessas medições.

As sondas de medição da elevação da superfície livre foram colocadas em diferentes pontos do canal distinguindo-se três conjuntos das mesmas, B1 - B2, S1 - S2 e L1 - L8. As duas primeiras sondas, B1 e B2 foram colocadas perto do batedor. A frequência de aquisição de dados destas sondas B1 e B2 é de 40 Hz e o seu registo serviu para verificar se a altura de onda produzida pelo batedor estava de acordo com o desejado. A sonda S1 colocou-se após a B2 e a S2 na última rampa antes do coroamento para medir o espraio (run-up). Para estas sondas e para as L1-L8 foi usada uma frequência de 50 Hz. As sondas L1 a L7 e a S1 foram usadas para registar a elevação da superfície livre ao longo do canal e a L8 para detetar galgamentos numa secção do coroamento. O batedor, instalado no início do canal tem capacidade de criar ondas regulares ou irregulares.

A Tabela 2 mostra a distância de cada uma das sondas ao batedor.

Tabela 2 - Distância das sondas de medição à posição de repouso do batedor.

Sonda	B1	B2	S1	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Distância ao batedor (m)	3	3,4	4,2	21	23,5	26,2	28,85	31,45	31,95	32,55

A Figura 14 representa a localização das sondas ao longo do canal com as respetivas distâncias em metros.

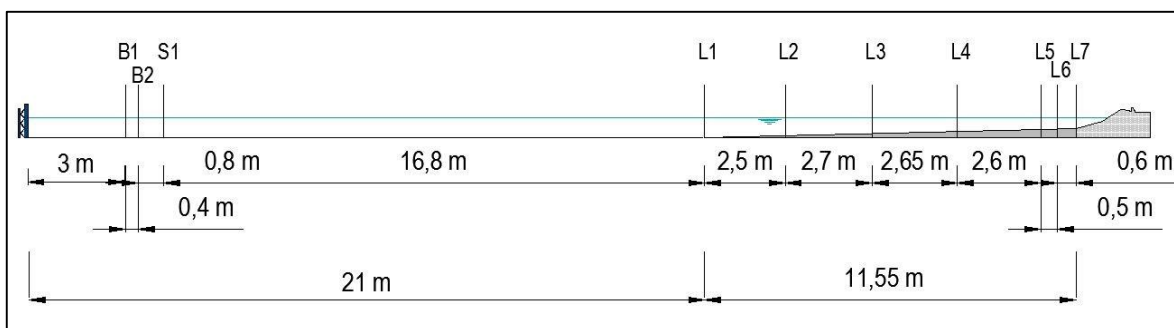


Figura 14 - Localização das sondas ao longo do canal.

Por fim a balança foi montada após o coroamento da estrutura de forma a medir individualmente o volume de água de cada galgamento que ocorra. Entre o coroamento e a balança acrescentou-se uma rampa que conduz toda a água que ultrapassa a estrutura diretamente até à balança. O peso na balança foi registado a cada segundo do ensaio. A Figura 15 mostra a localização da balança com a ligação da rampa entre a estrutura e a mesma.

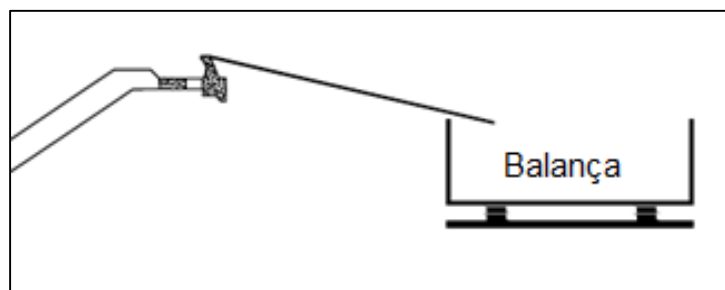


Figura 15 - Estrutura com a balança após a rampa.

Para que se possa analisar também a distribuição espacial das ondas após o galgamento, realizou-se outro conjunto de ensaios em que se montou 6 tabuleiros inclinados com 40 cm de largura espaçados de 0,15 m entre si. Foram colocados antes da balança para contabilizar o caudal a diferentes distâncias do coroamento.

A Figura 16 mostra a disposição desses tabuleiros.

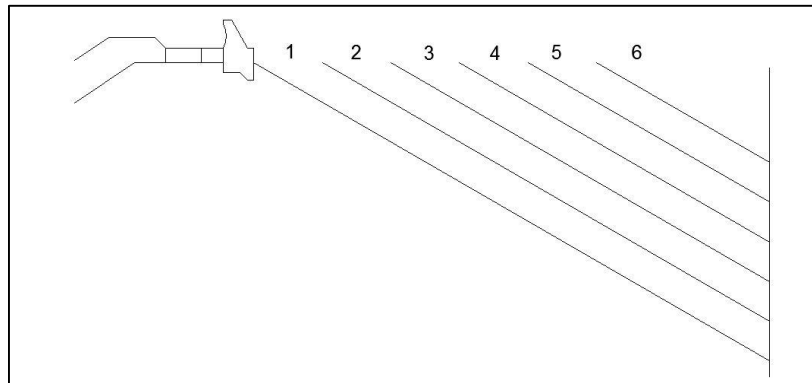


Figura 16 - Distribuição dos tabuleiros após o coroamento.

Para a monitorização de todo o ensaio foram utilizados conversores de sinal ligados a computador a controlar os diferentes equipamentos de medição instalados ao longo do canal. A realização do ensaio foi ainda registada em vídeo.

3.3.4. Testes realizados

Foi definido que cada teste teria de reproduzir 1000 ondas. Por esta razão, a duração dos ensaios dependeu do período de onda em vigor em cada ensaio. Os ensaios foram realizados apenas para ondas irregulares usando o espectro JONSWAP. Antes de se iniciar os ensaios foram feitos testes preliminares para confirmar que as características da agitação gerada pelo batedor coincidem com as pretendidas.

Foram realizados um total de 168 ensaios para diferentes valores de nível da água, período e altura dos estados de agitação. Foram usados dois valores de nível de maré, 5 valores de período de pico do estado de agitação e 9 valores para a altura significativa do mesmo estado de agitação.

Realizaram-se duas séries de ensaios. A primeira englobou 130 testes com medições da elevação da superfície livre, espriamento, volume galgado, e taxa de galgamento.

A Tabela 3 mostra o número de ensaios realizados para cada combinação de parâmetros, nível de maré, período de onda e altura de onda.

Tabela 3 - Ensaio realizados com cada combinação de parâmetros para a primeira série.

Nível de maré [m]	0,669					0,633			
Hs [m]	1,15	1,44	1,72	2,02	2,60	1,15	1,44	1,72	2,02
0,104	(2)								
0,115	(2)	(3)		(4)	(2)	(3)	(2)		(2)
0,125			(4)		(4)			(2)	
0,135		(3)	(3)	(3)			(2)	(2)	(4)
0,146			(3)				(3)	(2)	
0,156		(2)	(3)	(11)			(2)	(2)	(7)
0,167		(3)	(3)	(2)					(3)
0,177			(3)	(20)					(3)
0,188				(11)					

A segunda série teve 38 ensaios. Foi nesta série que se instalou os tabuleiros para a medição da distribuição dos caudais. Registrou-se também a elevação da superfície livre nas mesmas sondas ao longo do canal e a taxa de galgamento. Esta série foi feita com menos parâmetros. Foi utilizado apenas um nível de maré, 4 períodos de pico e apenas 5 alturas significativas de onda.

A Tabela 4 mostra o número de ensaios realizados para cada combinação dos três parâmetros.

Tabela 4 - Ensaio realizados com cada combinação de parâmetros para a segunda série.

Nível de maré [m]	0,669			
Hs [m]	1,44	1,72	2,02	2,60
0,135				(5)
0,146				
0,156			(5)	
0,167	(3)	(5)	(5)	
0,177		(5)	(5)	
0,188			(5)	

3.3.5. Resultados obtidos

Os resultados obtidos foram analisados e utilizados para o cálculo de outros parâmetros para a análise da agitação. Os valores que se recolheram diretamente das sondas de medição foram as elevações da superfície livre relativamente ao nível médio não perturbado, para cada ponto de medição. Os parâmetros foram calculados através de uma aplicação desenvolvida em Python – Processamento de dados (Poseiro, 2015).

Tabela 5 - Parâmetros calculados através da aplicação em Python.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	E	H1/10	T1/10	Hmax	Tmax	nWaves
B1	8,89	12,73	6,2	3,47	10,89	15,06	17,3	19,4	1391
B2	8,83	12,5	6,17	3,49	10,73	15,17	16,28	19,75	1372
S1	8,91	11,86	6,17	3,36	10,8	14,75	17,58	19,12	1416
L1	8,76	12,37	6,08	3,52	10,38	14,78	14,83	19,4	1429
L2	8,66	12,14	5,96	3,56	10,38	14,87	15,94	21,06	1422
L3	8,59	11,32	6,01	3,6	10,06	15,44	13,03	24,25	1378
L4	8,91	12,14	6,23	3,59	10,52	14,96	14,96	19,54	1384
L5	7,95	10,34	5,5	4,57	9,6	15,42	14,68	21,06	1514
L6	9,6	12,14	6,66	3,9	12	15,57	17,66	29,1	1397
L7	9,85	12,14	6,93	3,7	11,63	15,18	17,52	34,09	1486

A Tabela 5 mostra alguns dos parâmetros determinados através da aplicação em Python – Processamento de dados. Estes parâmetros resultam de uma análise espectral do registo da elevação da superfície livre. Foram obtidos no segundo ensaio feito para uma altura significativa de 8,5 m e um período de pico de 12 s.

Começando na segunda coluna, Hm0 representa a altura de onda significativa em metros e Tp é o período de pico de onda em segundos. Hrms representa a altura média, quadrática em metros, E é o número de Iribarren, calculado com o comprimento de onda correspondente ao período médio, H1/10 e T1/10 a média dos 10 maiores valores de alturas de onda e períodos respetivamente em metros e segundos. Hmáx e Tmáx representam os valores máximos registados para a altura de superfície livre e período de onda

respetivamente em metros e segundos. O último parâmetro nWaves é o número de ondas que passam nos respetivos pontos.

No quadro encontra-se em falta valores para as sondas S2, e a L8. Neste trabalho os estudos foram feitos utilizando apenas as sondas representadas na tabela uma vez que os resultados da sonda S2 ainda estão a ser verificados e a sonda L8 serviu apenas para detetar a chegada de ondas ao coroamento da estrutura.

4. APLICAÇÃO DO MODELO SWASH

4.1. Introdução

Neste capítulo é descrita a análise feita com vista a estudar o funcionamento do modelo e a melhor aproximação possível da elevação da superfície livre e dos galgamentos registados nos ensaios.

Os testes iniciaram-se considerando ondas regulares e um domínio totalmente impermeável, tanto o fundo como o quebra-mar. Estudou-se, de seguida, a mesma situação para ondas irregulares, com a mesma camada impermeável. Por fim, adicionou-se uma camada porosa correspondente ao quebra-mar, caso mais semelhante aos dos ensaios. No caso das ondas regulares e considerando uma camada impermeável, foi efetuado um estudo de sensibilidade à variação de parâmetros físicos relacionados com o atrito de fundo e viscosidade. No caso da camada permeável foi efetuado um estudo variando a porosidade.

Para os testes efetuados, começou-se sempre por avaliar a elevação da superfície livre. Foram aplicadas sondas no modelo numérico, nos mesmos pontos dos ensaios, e registados os valores da elevação de superfície livre. A partir desses valores, utilizando a aplicação em Python – Processamento de dados (Poseiro, 2015) calcularam-se parâmetros de agitação marítima que, foram então comparados com os dos ensaios. Após a verificação desses parâmetros, efetuou-se também a determinação dos valores de caudal galgado na estrutura.

No modelo físico, foram feitas três repetições do mesmo ensaio, usando os mesmos valores de altura e período de onda. Para escolher qual dos ensaios seria usado na comparação de resultados com o modelo numérico, foi feita a média entre os resultados dos três ensaios, utilizando todos os parâmetros, e calculado qual se aproximava mais a essa média. Foi escolhido o segundo ensaio realizado, com a especificação S85_TP12_PM_ENSAIO_3_Novo. No Anexo D encontra-se a tabela completa com os valores de todos os parâmetros determinados a partir dos seus resultados.

É importante salientar que os ensaios realizados em modelo físico foram feitos em escala reduzida com um fator de 1:48. No entanto, as simulações feitas no modelo SWASH foram feitas à escala real a partir das dimensões usadas nos ensaios. Assim sendo, a batimetria implementada e os caudais obtidos no modelo são todos à escala real.

4.2. Batimetria

A batimetria foi construída com base na geometria implementada nos ensaios, respeitando as dimensões do ensaio em vez do quebra-mar sul do porto da Praia da Vitória. Com efeito, e embora se tenha pretendido reproduzir no modelo ensaiado no canal o quebra-mar, como acontece em modelos que sofrem uma alteração de escala, nem todas as medidas ficaram exatamente como as do quebra-mar. Houve alterações nas cotas do coroamento.

A Figura 17 mostra a batimetria construída para o modelo SWASH. À esquerda encontra-se representado o batedor, apenas de forma exemplificativa (não entra no modelo), a cota mais baixa do fundo situa-se a -30 m e está marcada a linha do zero hidrográfico. Estão também marcadas as localizações das sondas ao longo do canal com as respetivas distâncias entre si.

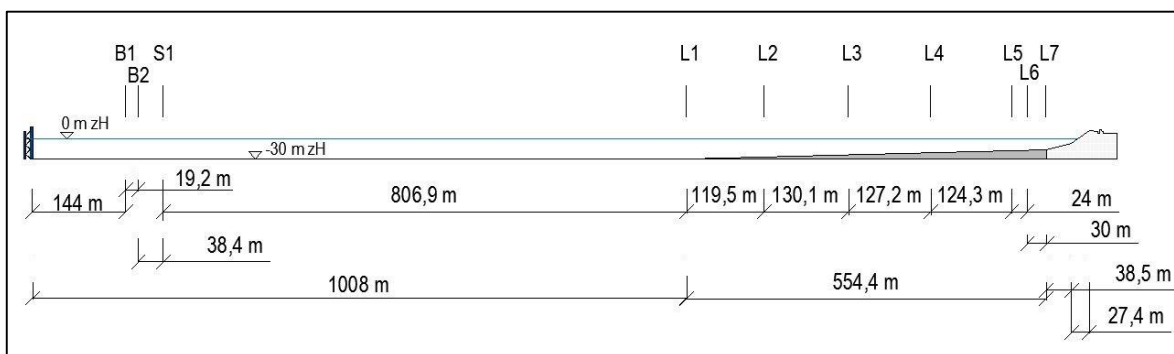


Figura 17 – Batimetria usada no SWASH.

Existe uma limitação na representação da batimetria no SWASH. Ao definir uma batimetria, esta é feita num conjunto discreto de pontos igualmente espaçados seguindo o eixo x do domínio. É usado um ficheiro extra em que define para cada ponto qual a cota

correspondente do fundo. Assim, não é possível definir uma curvatura na vertical, como deveria ter no coroamento. Como tal, na definição da batimetria no SWASH, o coroamento não coincide com o utilizado nos ensaios, embora esta diferença não implique grande alteração nos resultados.

A Figura 18 mostra como ficou definida em pormenor a zona do coroamento da estrutura, onde se pode ver uma parede vertical onde deveria ter uma curvatura com concavidade para o lado direito.

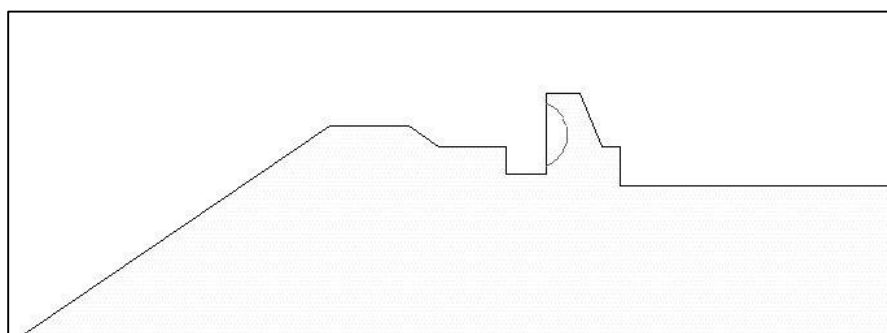


Figura 18 - Pormenor do coroamento inserido no SWASH.

O domínio de cálculo foi definido inicialmente com 1700 m e posteriormente, por ter sido necessário acrescentar uma *sponge layer*, foi aumentado várias vezes, até um máximo de 2263 m, de forma a serem testados vários comprimentos dessa camada. O espaçamento utilizado entre os pontos da batimetria foi de 0,05 m para que houvesse boa definição para os resultados. O ficheiro da batimetria tem a extensão “.bot” para que seja referido no ficheiro de dados, e para que seja lido durante a simulação, é usada a função INPGRID BOTTOM, definindo a própria grelha da batimetria. Esta pode ter uma dimensão total diferente da grelha computacional, mas nunca inferior a esta grelha.

A Figura 19 mostra, como exemplo, uma batimetria em que só parte da mesma é definida na grelha computacional.

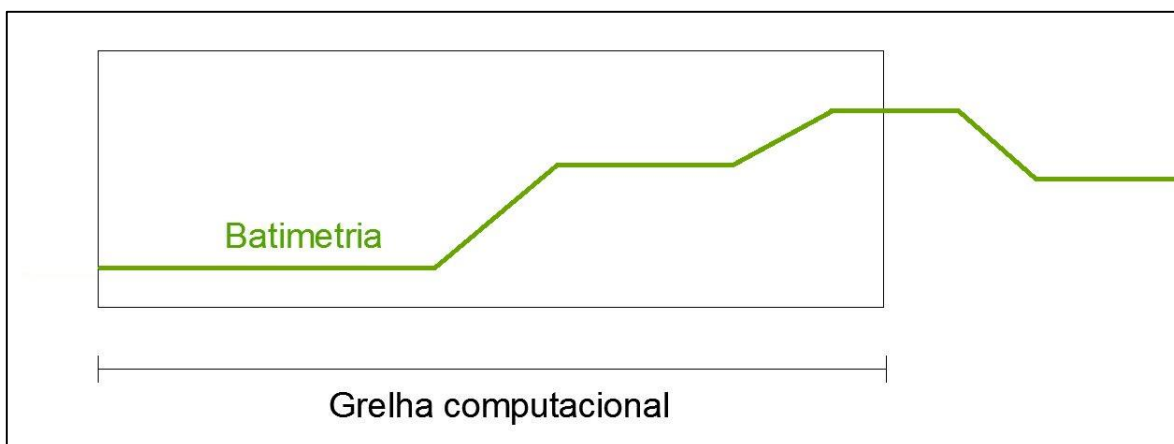


Figura 19 - Exemplo de como a batimetria pode ter uma dimensão diferente da grelha computacional.

Os espaçamentos utilizados quer na grelha computacional quer na batimétrica podem ser diferentes. Definida a batimetria, para que o SWASH leia o ficheiro correspondente, a função INPGRID tem de ser seguida da READINP BOTTOM.

Definida a grelha da batimetria, pode então ser definida a grelha computacional para a simulação, que terá de englobar a batimetria e a dimensão da camada de esponja se esta for incluída.

4.3. Discretização espacial e temporal

A discretização espacial é feita definindo-se a grelha computacional. É necessário ter definida a batimetria a estudar de forma a saber o comprimento que se pretende impor na simulação. Uma batimetria com 500 m implica que a grelha computacional tenha no mínimo 500 m. A grelha computacional deverá sempre conter a grelha da batimetria, caso contrário a simulação não ocorre. A grelha é definida usando a função CGRID, após a qual é explicitado as dimensões em x, em y, angulo de rotação em relação à origem e número de pontos a ler (de acordo com o intervalo que se pretende) para x e y. No caso de ser apenas em 1D, uma delas fica definida como comprimento 0.

O tempo de simulação depende bastante do caso de estudo. Neste caso, pretende-se simular o tempo dos ensaios em modelo reduzido. Para tal, as simulações foram feitas de

forma a terem uma duração semelhante à dos ensaios que se pretendia comparar. As simulações foram feitas para 4 horas e 25 minutos. Este é o último parâmetro a definir na lista do ficheiro de dados. Através da função COMPUTE define-se o intervalo de tempo da simulação e a sua duração. É definido em HHmmss, sendo H horas, m minutos e s segundos, ou seja, para simular duas horas e meia é escrito 023000.

Quanto maior o tempo imposto e maior a discretização espacial, maior será o tempo total que dura a simulação a ser feita. Outro ponto essencial é a definição das dimensões, ou seja, se se trata de uma simulação em 2D ou 3D. Neste caso é apenas 2D. Uma simulação para ondas irregulares com camada porosa pode demorar entre 3 a 5 horas. Os cálculos foram efetuados num computador com um processador Intel Core i3-350M de 2,26 GHz. Caso se faça uma simulação em 3D pode implicar uma espera de alguns dias. Seria necessário aumentar o intervalo espacial de forma a diminuir o tempo de duração da simulação.

A definição da dimensão foi feita através da linha de comando MODE DYN ONED.

Relativamente ao número de camadas utilizadas na discretização vertical, este aspeto é definido pelo comando VERT seguido do número de camadas a utilizar. Como explicado no capítulo 2, este número depende do valor de k_d associado. Este valor é determinado utilizando as Equações 17 e 18.

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (17)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (18)$$

Em que λ representa o comprimento de onda, g a aceleração da gravidade, T o período de onda e k o número de onda.

Para um período de 12 s tem-se, para uma profundidade de 30 m, $k=0,03$ e $k_d=0,84$. Pela Tabela 1, de acordo com o manual corresponde a apenas uma camada tendo um erro associado de 2%. Para períodos a partir de 16 s, já poderá ser necessário utilizar mais que uma camada.

4.4. Condições de fronteira

Estas condições foram definidas para duas situações diferentes. Estudou-se primeiro o comportamento para ondas regulares e depois para ondas irregulares. Em ambos os casos, as simulações foram feitas para comparação com os valores obtidos nos ensaios feitos com valor de altura de onda de 8,5 m e período de onda de 12 s.

No SWASH as fronteiras são descritas como os pontos cardeais. Neste caso, as simulações foram realizadas em 2D (1D na linguagem do SWASH), existindo assim 2 fronteiras. As fronteiras laterais, esquerda e direita, são as fronteiras oeste e este respectivamente. Em simulações 3D existe também as fronteiras norte e sul (de cima e de baixo).

4.4.1. Ondas regulares

A geração de ondas regulares foi efetuada a partir da fronteira oeste com um período de onda constante de 12 s. Foram estudadas várias alturas de onda incidente de forma a verificar qual se aproximava mais dos resultados para 8,5 m. Nesta mesma fronteira onde se gera a onda, a oeste, foi também considerado o comando WEAK, de forma a tornar esta pouco refletiva. A fronteira este não teve qualquer condição imposta pelo que é considerada fechada podendo criar alguma reflexão.

Este estudo serviu apenas para efetuar testes de sensibilidade a alguns parâmetros físicos no modelo SWASH. Com efeito, uma vez que no modelo físico foram utilizadas ondas irregulares, não se espera que exista uma grande aproximação entre os resultados do modelo físico e os do modelo numérico. A grande diferença entre ondas regulares e irregulares, relativamente à simulação no modelo numérico, é que as regulares implicam um menor tempo de simulação. Assim permite fazer mais estudos em volta da resposta do modelo numérico a diferentes linhas de comando num menor intervalo de tempo, comparando com as irregulares.

4.4.2. Ondas irregulares

Foi para este tipo de ondas que o estudo foi mais exaustivo. Na fronteira oeste foi considerada uma onda irregular com o espectro de JONSWASP com um $Y=3,3$ e com os

respetivos dados referentes à altura de onda significativa, ao período de pico, direção da agitação e dispersão direcional. As duas últimas foram mantidas nulas por ser uma simulação em 2D. Na mesma fronteira, aplicou-se o comando WEAK para que esta fosse pouco refletiva, tal como no caso de ondas regulares.

Na fronteira este foi aplicada uma camada de esponja. Iniciou-se com um comprimento de apenas 10 m que se mostrou insuficiente. Aquele comprimento foi sendo aumentado até três vezes o comprimento de onda. Este comprimento não é especificado pelo manual, tendo sido adotado por conselho de Víctor Pés (2016). Sem esta camada, a fronteira este funciona como uma parede, pelo que se verifica bastante reflexão que se propagava até pelo menos ao coroamento da estrutura, influenciando a agitação e também o caudal contabilizado após o coroamento. No final, a camada ficou com apenas 100 m. Verificou-se que este comprimento é suficiente para diminuir a reflexão.

No início da simulação, existe sempre um intervalo de tempo necessário para que a geração de ondas estabilize, assim como acontecia nos ensaios em modelo físico. Os primeiros minutos não foram considerados. Foi também aconselhado, desta vez por Suzuki Tomohiro (2016), para esta situação, retirar as primeiras 5 ondas, que para um período de 12 s, corresponde apenas a 1 minuto. Para tal, é utilizado o comando SMOOth, que se encarrega de subtrair o trecho correspondente à série temporal. No entanto, esta subtração do primeiro minuto revelou-se pouco importante uma vez que a duração da simulação numérica é de, pelo menos, 4 horas.

4.5. Parâmetros físicos e numéricos

De forma a aproximar os resultados obtidos no modelo com os dos ensaios, grande parte do estudo consistiu na variação de diversos parâmetros físicos. O SWASH tem disponível uma grande variedade de comandos e definições de forma a melhor adaptar o modelo a situações reais.

Foram utilizados como valores iniciais de velocidade e altura de água nulos, portanto uma velocidade de 0 m/s e uma altura de 0 m, uma vez que os ensaios eram sempre iniciados com a água no canal em repouso. O nível de maré foi sempre mantido nos 2 m e definiu-se uma profundidade mínima de 0,001 m.

Relativamente à consideração da pressão não hidrostática manteve-se sempre constante esta opção, utilizando o comando NONHYdrostatic que, por omissão, utiliza o esquema de Keller-box.

Foi estudada a influência de dois parâmetros físicos, atrito de fundo e viscosidade. Quanto ao atrito de fundo, o SWASH assume, por omissão o valor de $0,019 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para o coeficiente de rugosidade de Manning. Foi utilizado este valor em várias simulações até, devido à irregularidade dos fundos, ter sido necessário aumentar para $0,03 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Para a viscosidade cinemática foram estudados valores a partir de $0 \text{ m}^2/\text{s}$, até $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$.

Relativamente à conservação da quantidade de movimento foram usados dois comandos de forma a ajudar o modelo a convergir. De início, não tinha sido definido nenhum comando para a conservação da quantidade de movimento no ficheiro de dados, no entanto para o cálculo do galgamento verificou-se necessário para que fosse possível obter valores. Na falta de instruções específicas, o SWASH assume por omissão esquemas de segunda ordem BDF, para a direção horizontal e de primeira ordem para a direção vertical. Os comandos utilizados depois foram os seguintes:

DISCRET UPW NONE (esquema padrão aplicado para os termos de advecção horizontal das equações de quantidade de movimento).

DISCRET UPW UMOM V NONE (esquema padrão aplicado para os termos de advecção vertical das equações de quantidade de movimento).

Desta forma são adotados esquemas de primeira ordem para a direção horizontal e também para a vertical, como seria por omissão.

A discretização temporal também foi sofrendo várias alterações. De início adotou-se os valores recomendados para o número de Courant, com 0,8 para o limite máximo e 0,2 para o mínimo. Ao alterar de ondas regulares para irregulares, foi necessário alterar os valores limites. O máximo foi sendo diminuído até 0,2 e o mínimo foi diminuído até 0,01. Os valores acabaram bastante diferentes dos mencionados no manual uma vez que para esta situação não estabilizavam tão bem a simulação, ocorrendo frequentemente erros referentes ao intervalo de tempo.

4.6. Camada porosa

Foram feitos vários estudos apenas com a camada impermeável de forma a estudar primeiro em que medida os vários parâmetros influenciavam os resultados.

A Figura 20 mostra a batimetria estudada quando se considerou o fundo e a estrutura totalmente impermeáveis.

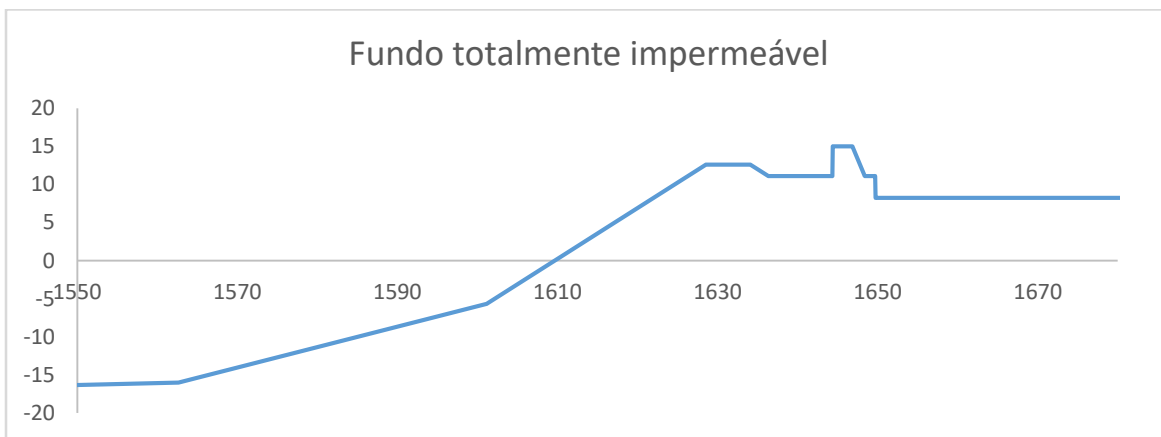


Figura 20 – Perfil considerando uma camada totalmente impermeável.

Ao adicionar a camada de tetrápodes, é necessário adicionar várias linhas de comando, assim como ficheiros de apoio. Pretende-se que a camada porosa seja definida como mostra a Figura 21.

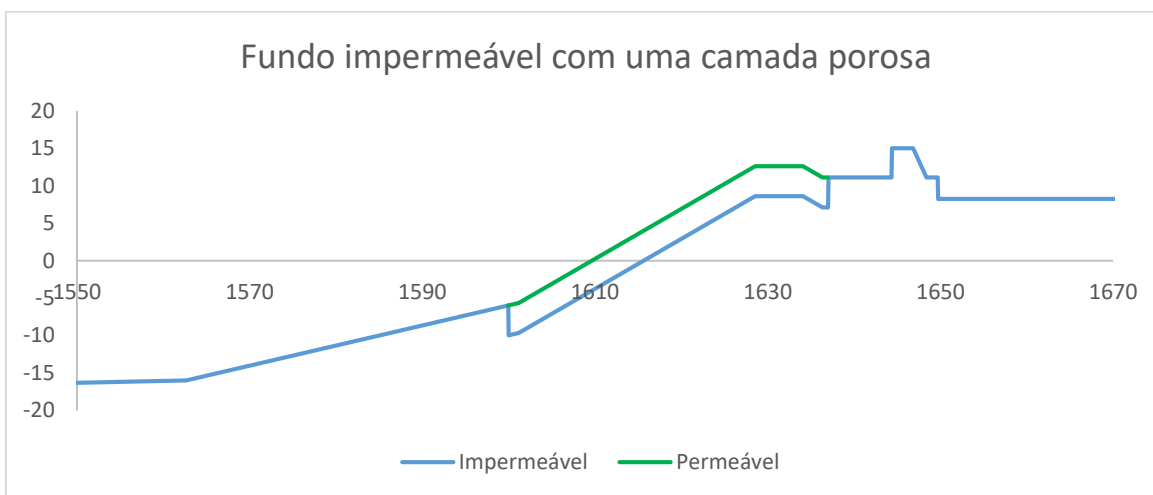


Figura 21 - Pormenor da definição da camada porosa.

Na Figura 21 a linha azul representa a batimetria definida como impermeável e a verde representa-se a camada porosa.

Para inserir a nova camada permeável, é necessário que a batimetria, na zona da camada, seja reduzida exatamente do valor da altura da camada a inserir. São necessários 3 ficheiros auxiliares para a definição da camada. Um para a altura da camada, um para a dimensão das partículas e outro para o grau de porosidade. Usou-se uma espessura de 4 m para a camada e 2 m para a dimensão das partículas (altura média dos tetrápodes). A porosidade foi analisada para vários valores dentro do intervalo de 0 a 1.

Ao fazer a comparação com os resultados dos ensaios foi possível identificar qual o melhor valor para definir a porosidade para uma camada de tetrápodes quando perante uma agitação de ondas irregulares com altura de 8,5 m e 12 s de período de pico.

A leitura dos ficheiros auxiliares é feita de acordo com o mesmo princípio que o ficheiro da batimetria. Estes têm de ser referenciados acompanhados da sua respetiva grelha computacional e para serem lidos têm de ter a sua própria extensão “.n”. Embora a camada se encontre apenas ao longo de 35 m, a sua grelha tem de ter o mesmo comprimento que o domínio. São definidos os valores característicos da camada para o intervalo onde ela se encontra, e no restante domínio é definida como um troço impermeável como o resto da batimetria. Atribui-se um valor de porosidade 0, uma dimensão de partículas de 0 m e altura da camada também de 0 m. Caso contrário o SWASH faz a simulação completa, sem apresentar erros, mas sem contabilizar a existência da camada.

4.7. Galgamentos

Nos ensaios em modelo físico o volume total foi medido com recurso a uma balança onde foi pesada toda a água que passou por cima da estrutura. Esse valor de volume, dividido pelo tempo total que decorreu o ensaio obteve-se o valor médio de caudal. Para o segundo ensaio realizado para 8,5 m de altura significativa e 12 s de período de pico (ensaio utilizado neste estudo) o caudal obtido é de 1,3098 l/s/m. Para este caudal, o volume correspondente é de 2,8357 litros, à escala do modelo. É este volume que será usado na comparação com o resultado do SWASH.

No SWASH, o caudal medido corresponde apenas a volumes de água em movimento concentrado em ondas. Toda a água que seja dispersa por colidir com a estrutura ou na turbulência com outras ondas não é contabilizada.

A medição do caudal na simulação será feita em vários pontos após o ponto mais alto do coroamento. Foram usados 11 pontos para a medição, espaçados de um metro entre cada, de forma a visualizar a variação do caudal ao longo dos mesmos. Começou por ser usado o comando QMAG que fornece o caudal instantâneo no ponto escolhido em m^2/s . Foi posteriormente alterado para DISCH por a simulação ser feita em apenas uma camada. Este fornece também o caudal instantâneo em m^3/s .

4.8. Ficheiros de resultados

Existem dezenas de parâmetros que podem ser pedidos nos resultados do SWASH. Podem ainda ser pedidos de diferentes formas. No presente caso, um dos ficheiros pedidos foi um ficheiro em Excel com a variação de vários parâmetros ao longo de toda a simulação com intervalos de 5 s. Foi utilizada a seguinte linha de comandos:

```
TABLE 'LINE' HEAD 'surface.tbl' TSEC DIST WATL BOTLEV DISCH OUTPUT 000000.000  
5.00 SEC
```

em que é definido o nome do ficheiro a criar (surface.tbl) e por ordem o tempo em segundos, a distância à origem, a elevação da superfície livre, a cota da batimetria e o valor do caudal. A partir deste ficheiro e utilizando uma aplicação em Python – Read to graph (Poseiro, 2015), para a criação de imagens, é possível visualizar a variação da superfície livre ao longo de todo o tempo de simulação.

De seguida é possível ver uma sequência de imagens obtidas através do ficheiro de resultados com a aplicação em Python na Figura 22.

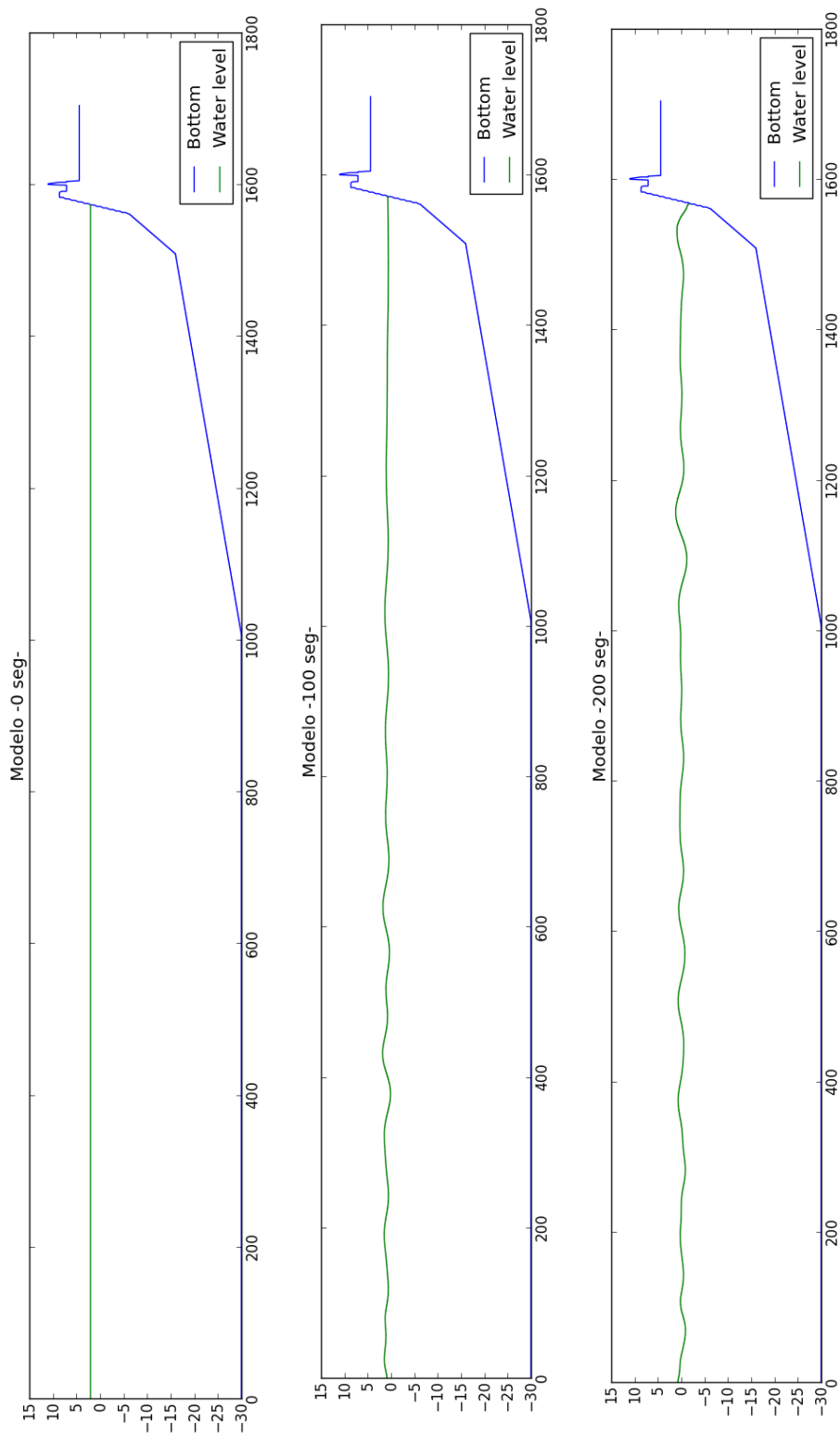


Figura 22 - Imagens da elevação da superfície livre obtidas através do programa Python.

Foi criado um ficheiro de resultados para cada sonda usada nos ensaios. Cada linha de comando diz respeito a uma sonda apenas, contendo a coordenada do ponto onde a sonda se situa. Uma das linhas, referente à primeira sonda, B1 é a seguinte:

```
POINT 'B1' 144 0
```

```
TABLE 'B1' HEAD 'B1.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.17 SEC
```

É indicado o nome e coordenadas em x e y. De seguida especifica-se o nome do ficheiro a criar e que dados ele deve conter. Neste caso, por ordem, tem-se o tempo em segundos e a elevação da superfície livre. A linha inclui ainda o instante de início do registo (0 s) e a frequência de amostragem da sonda (0,17 s). O ficheiro terá a informação detalhada em intervalos de 0,17 s e irá ser iniciado aos 0 s. Este comando repete-se para as sete sondas em estudo com a respetiva coordenada, nome e frequência.

Por fim tem-se ainda os ficheiros de resultados para os valores de caudal. Os 11 pontos onde é pedido o valor do caudal começam no ponto 1645 m e vão até 1655m. A linha de comandos é idêntica aos pontos das sondas acrescentando o parâmetro DISCH para o caudal. A Figura 23 mostra onde se situam os pontos escolhidos para a medição do caudal.

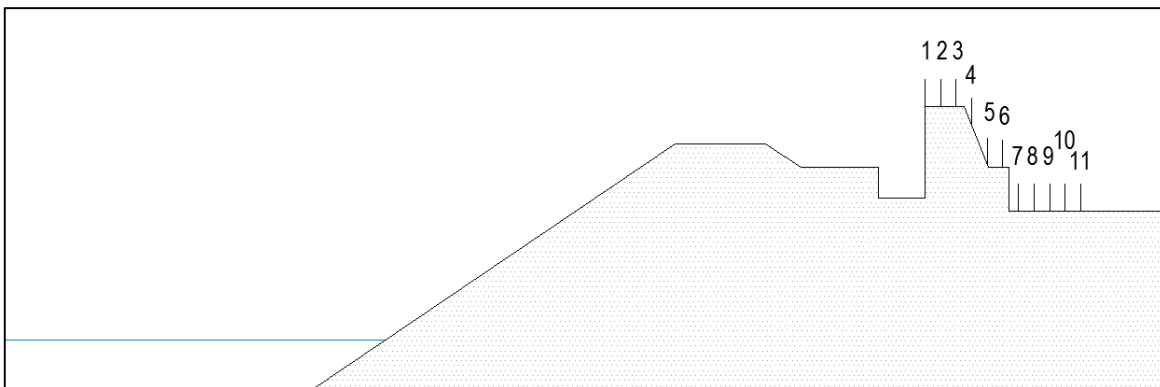


Figura 23 - Localização dos pontos para medição do caudal.

Em anexo apresenta-se, como exemplo, um ficheiro de dados utilizado em simulações com ondas regulares em fundo impermeável, com ondas irregulares em fundo impermeável e com ondas irregulares utilizando uma camada porosa. São respetivamente os anexos A, B e C.

5. RESULTADOS E COMPARAÇÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo efetua-se a comparação dos resultados do modelo SWASH com os valores obtidos em modelo físico.

Como referido, começou-se pela representação do fundo e da estrutura de forma mais simples, considerando o fundo e a estrutura impermeáveis. Efetuaram-se testes para definir as melhores condições de cálculo do modelo SWASH, nomeadamente as fronteiras, as condições de agitação e os restantes parâmetros necessários no ficheiro de dados para que a simulação seja possível. Só depois se considerou uma camada porosa na estrutura para representar os tetrápodes.

A construção do primeiro modelo foi feita em várias fases, onde em cada uma se foi adicionando uma linha de comando relativa a condições de fronteira ou parâmetros físicos de forma a ser perceptível a sua influência, e a verificar que foram processados de forma correta sem prejudicar o resto da simulação. Desta forma a deteção de erros é mais fácil e de mais rápida correção.

Inicialmente foram simuladas ondas regulares. Por requererem um tempo de computação menor, é mais fácil estudar as condições de fronteiras que mais se adequam, assim como as alterações provocadas na superfície livre pelos parâmetros físicos. Aqui criou-se as linhas de comando gerais a aplicar nos pontos seguintes.

De seguida implementou-se as ondas irregulares. Existe uma grande diferença quando se altera a característica das ondas e é aqui que se começa a obter resultados mais próximos dos ensaios físicos, uma vez que foram as usadas nos ensaios.

No terceiro passo é implementada a camada porosa correspondente aos tetrápodes. São definidos os valores correspondentes à porosidade, dimensão das partículas e altura da camada. Por fim, utilizando o modelo construído, é calculado o caudal que atravessa a estrutura. Dado ser o que melhor caracteriza a variação da superfície livre, de acordo com os ensaios em modelo reduzido, deverá ser o que traduz os valores de caudal também mais próximos dos obtidos nos ensaios.

5.2. Análise da variação dos parâmetros característicos

Os parâmetros de agitação marítima utilizados no estudo foram obtidos através dos ficheiros de resultados do SWASH que foram processados pelo programa de cálculo Python – Processamento de dados (Poseiro, 2015). Os gráficos produzidos com esses resultados mostram a variação temporal em cada ponto correspondente a uma sonda. Foi ainda determinado o erro associado às diferenças entre cada valor obtido no SWASH e o correspondente obtido no ensaio físico.

Os erros apresentados ao longo deste capítulo são erros relativos e foram determinados utilizando a Equação 19.

$$\%_{erro} = \frac{|Valor_{ensaio\ físico} - Valor_{SWASH}|}{Valor_{ensaio\ físico}} \quad (19)$$

Foram escolhidos 6 parâmetros para realizar as comparações. Como mencionado no capítulo 3, relativo ao caso de estudo, os valores foram calculados apenas para 10 sondas, as sondas S2 e L8 não constam nos gráficos. A ordem de marcação das sondas é respetivamente B1, B2, S1, L1, L2, L3, L4, L5, L6 e L7.

Os valores representados em gráfico referentes a alturas são sempre apresentados em metros e os referentes a períodos em segundos. A abcissa de todos os gráficos é a coordenada x medida ao longo do canal. Nos mesmos gráficos apresentados, as linhas entre os valores de correspondentes a cada sonda não representam a variação entre as mesmas, servem apenas para que seja mais fácil de perceber a ordem entre as mesmas, devido à proximidade que existem entre algumas.

5.2.1. Ondas regulares

Aqui a batimetria foi definida como referido no capítulo 4 e definiram-se os valores iniciais que melhor se aplicam à situação estudada de acordo com as indicações do manual. A batimetria começou por ter apenas 1705 m, foi aumentada apenas depois de imposta a camada porosa. O período fixou-se logo em 12 s, provou-se que este não tem grande

alteração com a variação dos restantes parâmetros físicos. A altura significativa foi iniciada com 4 m e variou-se no ficheiro de dados até aos 6,5 m.

Foram variados os parâmetros físicos relativos à viscosidade, rugosidade do fundo e rebentação. Comparou-se também os resultados obtidos com a aplicação de pressão hidrostática e não-hidrostática. Embora o SWASH tenha sido criado especificamente para situações de pressão não-hidrostática, existe a opção de impor pressão hidrostática. As simulações resultantes mostraram que para esse caso, o programa corre a simulação, no entanto não recria um comportamento real. Ao aplicar um ficheiro de dados com as mesmas condições para pressão hidrostática e não hidrostática regista-se uma grande diferença nos resultados. Na primeira, a superfície livre mostra grandes variações ao longo do canal e um decréscimo da altura ao longo do canal próxima de 4 m. A segunda opção regista variações mais subtis, onde apenas junto à estrutura mostra maior alteração devido à reflexão provocada pela mesma. Daí fixou-se a pressão não-hidrostática.

Ao longo da construção do ficheiro de dados ocorreram diversos erros que impediram a simulação. O ficheiro criado com as mensagens de erro raramente era explicativo, não sendo óbvia a razão que terá levado ao bloqueio. Para que o modelo consiga convergir para o resultado final, ao adicionar linhas de comando era muitas vezes necessário ajustar o intervalo de tempo de computação e o intervalo do número de Courant.

Os gráficos de 1 a 6 mostram as variações dos valores de cada parâmetro em cada sonda obtidas nos ensaios, a azul, e as obtidas através do SWASH a vermelho escuro. Neste teste foi aplicada uma altura significativa de 6,5 m e um período de pico de 12 s.

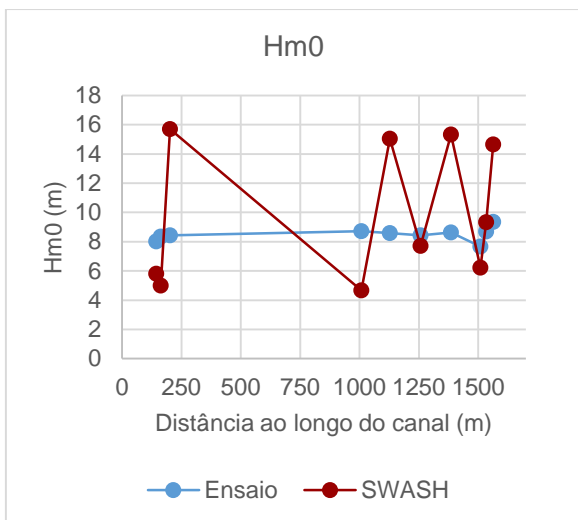


Gráfico 1 - Valores de Hm0 obtidos no SWASH para ondas regulares.

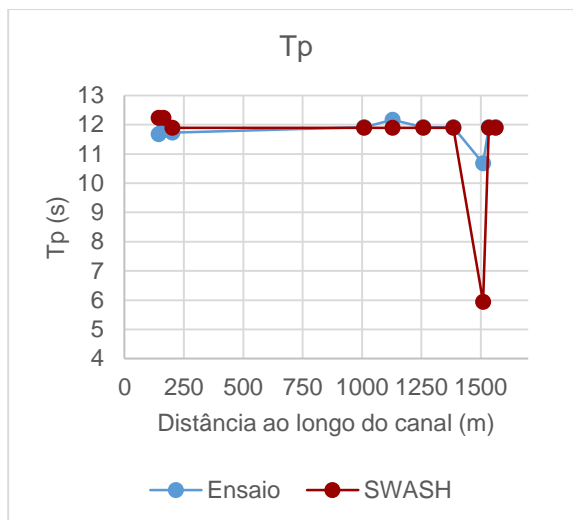


Gráfico 2 - Valores de Tp obtidos no SWASH para ondas regulares.

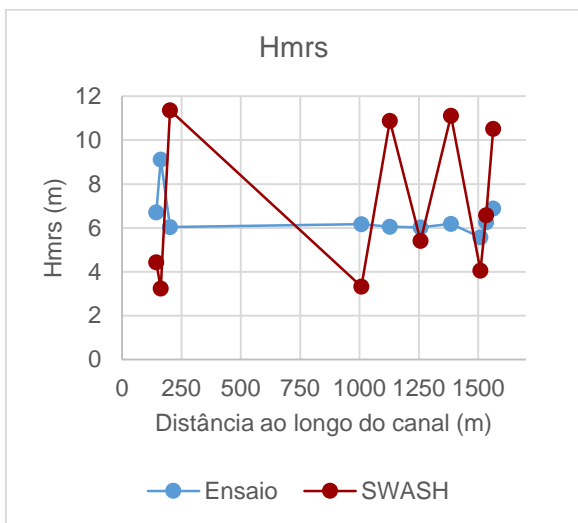


Gráfico 3 - Valores de Hmrs obtidos no SWASH para ondas regulares.

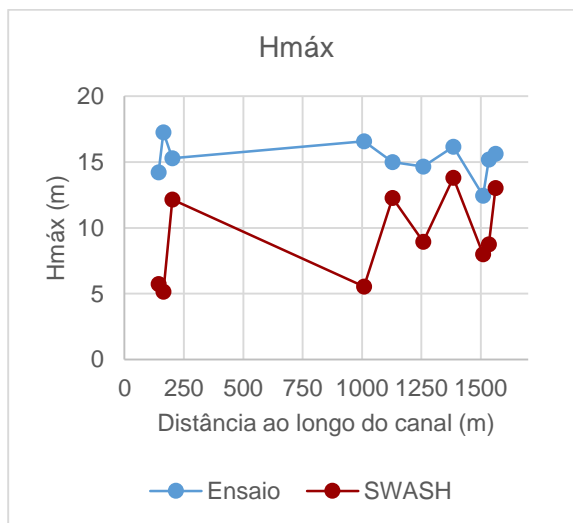


Gráfico 4 - Valores de Hmáx obtidos no SWASH para ondas regulares.

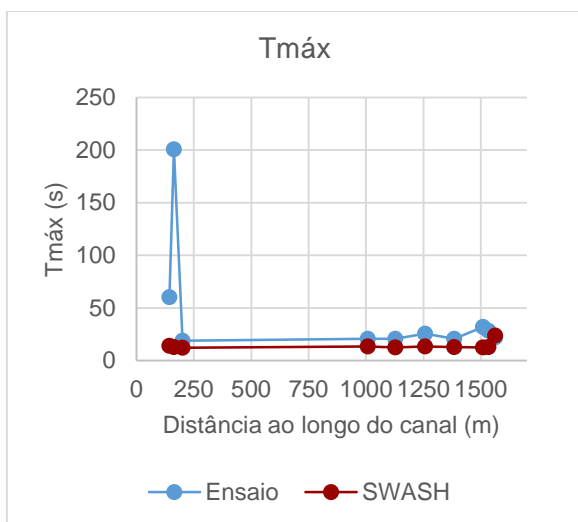


Gráfico 5 - Valores de $T_{máx}$ obtidos no SWASH para ondas regulares.

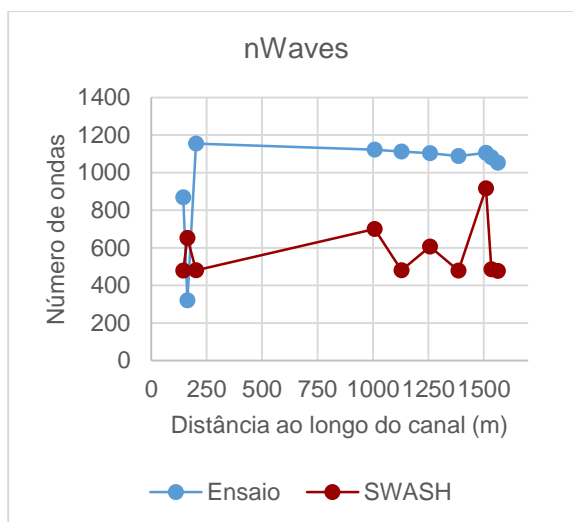


Gráfico 6 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas regulares.

Nos seis gráficos anteriores é possível verificar que o comportamento registado no ensaio se distancia bastante do obtido através do SWASH. Os valores mais próximos verificam-se nos registos do período. No entanto, mesmo nesses registos existem alguns pontos bastante díspares no início do canal.

Esta discrepância foi registada também nos outros 20 parâmetros, onde apenas os relativos ao período de onda mostraram ter alguma relação. O número de ondas registado é o parâmetro com maior erro, onde existe uma diferença de quase 700 ondas na sonda S1 (terceiro ponto no gráfico). O menor valor é de cerca de 200 ondas.

Como foi referido anteriormente, os testes feitos para ondas regulares serviu apenas para estudar a resposta do SWASH quando aplicados diferentes parâmetros e comandos no ficheiro de dados. Os seis gráficos apresentados anteriormente mostram apenas a diferença nos resultados quando aplicado este tipo de ondas, não servem de comparação uma vez que se aplicam tipos de ondas diferentes.

5.2.2. Ondas irregulares

Assim que se alterou de ondas regulares para irregulares (como usado nos ensaios) verificou-se uma grande aproximação dos resultados do modelo numérico aos resultados

dos ensaios, nomeadamente no que se refere às alturas de onda. Inicialmente, ainda sem a camada porosa, é possível obter erros relativamente baixos nas alturas de onda comparativamente aos observados nas ondas regulares.

Neste ponto foi definida a fronteira para a criação de ondas irregulares, eliminando a anterior para ondas regulares. Utilizou-se o espectro de JONSWAP como referido anteriormente com um valor de γ de 3,3. Este parâmetro não foi alterado, uma vez que é o valor mais comum para este género de condições. Definiu-se uma viscosidade de $0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$, foram testados valores superiores, no entanto este é o mais próximo da realidade, e rugosidade no fundo de $0,03 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ contrariamente ao valor recomendado de $0,019 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

O número de ondas continua bastante distante, embora já tenha diminuído, existe ainda uma diferença de perto de 500 ondas na primeira sonda e de 400 na última. Esta diferença mantém-se perto destes valores ao longo de todo o canal.

De seguida apresentam-se os gráficos obtidos na comparação feita para ondas irregulares em fundo impermeável para uma altura significativa de 8,5 m e período de 12 s.

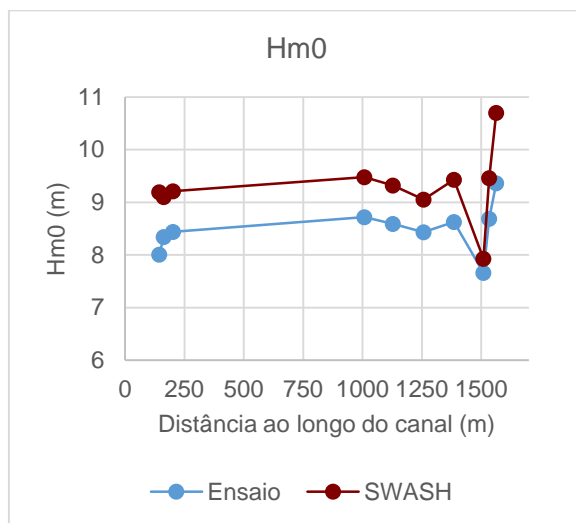


Gráfico 7 – Valores de H_m0 obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

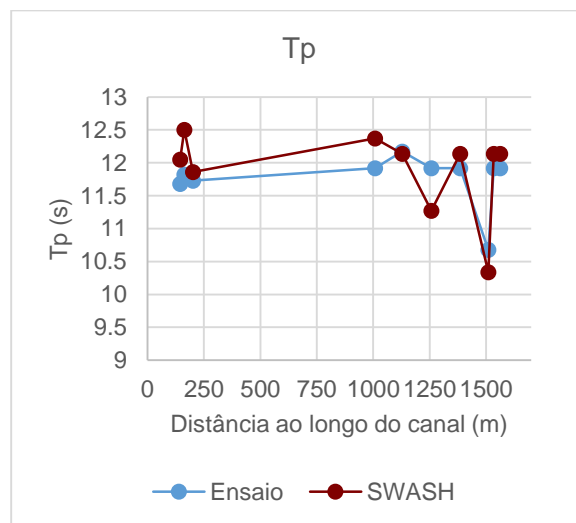


Gráfico 8 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

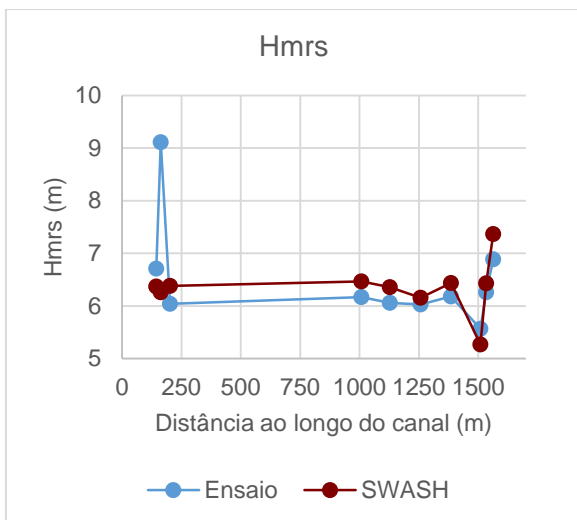


Gráfico 9 - Valores de Hmrs obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

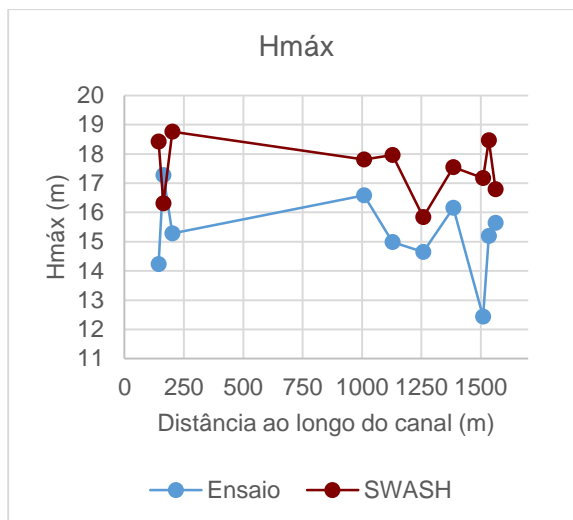


Gráfico 10 - Valores de Hmáx obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

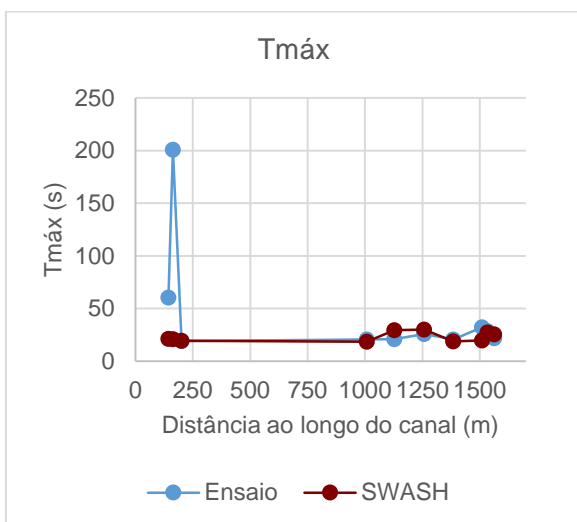


Gráfico 11 - Valores de Tmáx obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

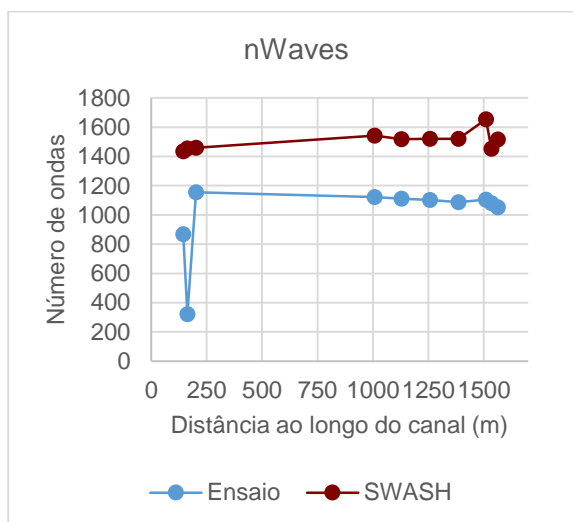


Gráfico 12 - Valores de nWaves obtidos no SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

A Tabela 6 mostra os erros associados às diferenças entre os valores obtidos nos diferentes modelos quando são aplicadas ondas irregulares propagando-se sobre um fundo completamente impermeável.

Tabela 6 - Erros entre os resultados dos ensaios e a aplicação do SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	Hmax	Tmax	nWaves
B1	14,7%	3,2%	5,1%	29,4%	64,7%	65,3%
B2	9,1%	5,8%	31,3%	5,6%	89,6%	353,3%
S1	9,1%	1,1%	5,6%	22,8%	1,5%	26,4%
L1	8,7%	3,8%	4,9%	7,4%	10,1%	37,4%
L2	8,5%	0,2%	5,0%	19,8%	41,4%	36,5%
L3	7,4%	5,5%	2,2%	8,1%	17,3%	37,8%
L4	9,3%	1,8%	4,2%	8,6%	9,4%	39,8%
L5	3,5%	3,2%	5,4%	38,1%	38,4%	49,6%
L6	8,9%	1,8%	2,7%	21,6%	4,3%	34,3%
L7	14,3%	1,8%	7,0%	7,4%	15,9%	43,9%

5.2.3. Aplicação da camada porosa

Ao aplicar a camada porosa, é esperado que haja uma maior dissipação de energia junto à estrutura, diminuindo a altura de onda assim como o número de ondas que passam sobre a estrutura. Neste ponto fixou-se a altura de onda em 8,5 m e averiguou-se o valor da porosidade que melhor se aplica à camada de tetrápodes. Variando o valor de porosidade no ficheiro auxiliar respetivo, procurou-se qual o valor com que se obtém melhor concordância nos valores.

Ao aplicar uma camada porosa no domínio é comum ocorrer erros na simulação. Pode ser necessário ajustar o intervalo de tempo, ou outro parâmetro. De forma a ser mais fácil detetar o erro, as simulações foram feitas em primeiro lugar sem os parâmetros físicos, e apenas depois de se mostrar estável foram então adicionados esses mesmos parâmetros. Desta forma torna-se mais fácil detetar qual o parâmetro que provoca o erro, percebendo de que forma o ajuste terá de ser feito.

A aplicação da camada porosa é feita implementando três novos ficheiros auxiliares correspondendo aos valores de porosidade, dimensão de partículas e altura da camada.

Porosidade 0

A porosidade nula significa no SWASH que a camada é completamente impermeável. Simulou-se primeiro esta situação de forma a verificar se ao aplicar este valor, se obtém os mesmos resultados quando aplicada a batimetria inicial completamente impermeável.

Aqui registou-se um problema na simulação. Ao aplicar uma camada impermeável, o programa cria aqui um erro, e admite uma parede vertical completamente impermeável não deixando passar nada. Ao chegar ao primeiro ponto da camada a simulação para. Este problema já foi verificado em Víctor Péz (2013) no seu trabalho sobre o SWASH. Apesar de o programa usado neste trabalho já ser uma versão mais atualizada que a utilizada por Péz (versão 1.10A), este problema persiste. Esta situação acontece para valores próximos de 0, até 0,1. Para valores de porosidade neste intervalo o modelo não é estável o suficiente para que faça a simulação completa.

Neste teste manteve-se a altura significativa de 8,5 m e período de pico de 12 s. Tem-se ainda como parâmetros físicos uma viscosidade de 0,0001 m²/s e rugosidade de fundo de 0,03 m^{1/3}/s.

A Figura 24 mostra uma sequência de três imagens em três pontos diferente da simulação onde é possível visualizar a “parede” criada pelo SWASH.

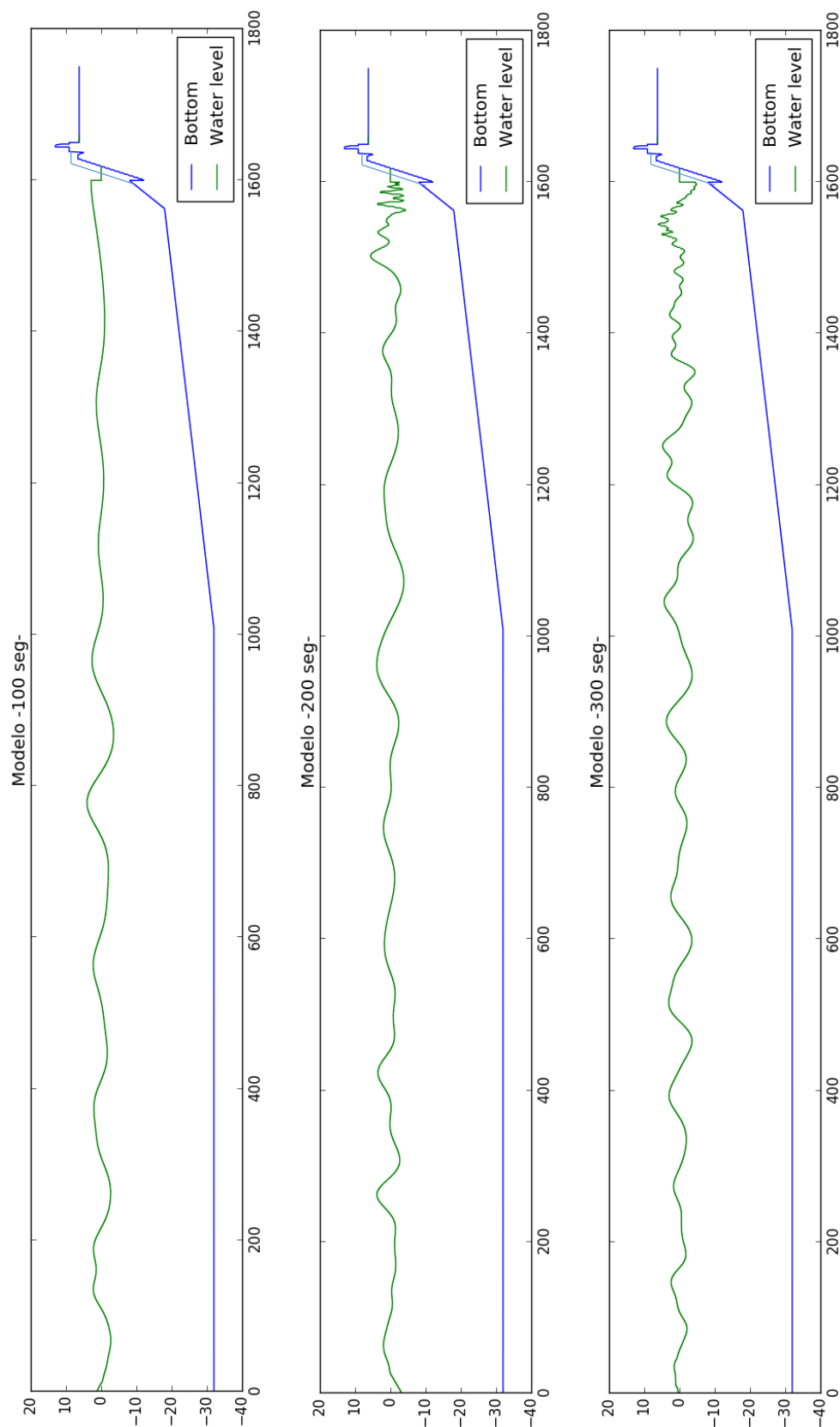


Figura 24 - "Parede" criada ao aplicar uma porosidade de 0.

Porosidade 1

Para uma porosidade máxima (porosidade com valor de 1 no SWASH, camada permeável) espera-se que os resultados sejam idênticos aos obtidos para uma situação sem a camada. Foi testado este valor de forma a perceber-se se isso realmente acontece. Têm-se portanto num teste, a batimetria com um abaixamento correspondente à altura da camada, e noutro, foi implementada a camada, definindo-se a sua altura e dimensões das partículas, mas com porosidade de 1 (máxima no SWASH).

Neste teste foi imposta uma altura significativa de 8,5 m e um período de 12 s. Tem-se uma viscosidade de 0,0001 m²/s e rugosidade de fundo de 0,03 m^{1/3}/s.

Concluiu-se que para uma porosidade máxima, o SWASH efetua os cálculos considerando para este valor de porosidade, que a camada não existe, uma vez que os resultados obtidos nos dois testes foram exatamente iguais em todos os pontos analisados.

Porosidade 0,45

O valor da porosidade recomendado pelo manual para quebra-mares é de 0,45. No entanto não é especificado para que género de quebra-mares no que respeita ao material utilizado ou até dimensões desse mesmo material. Foi aplicado esse valor para a porosidade, mantendo uma altura de 8,5 m e um período de onda de 12 s.

Os gráficos 13 a 18 mostram os valores obtidos no SWASH após a alteração da porosidade na camada, com o resto do fundo impermeável, com uma altura significativa de 8,5 m e período de onda de 12 s. Manteve-se também uma viscosidade de 0,0001 m²/s e rugosidade de fundo de 0,03 m^{1/3}/s.

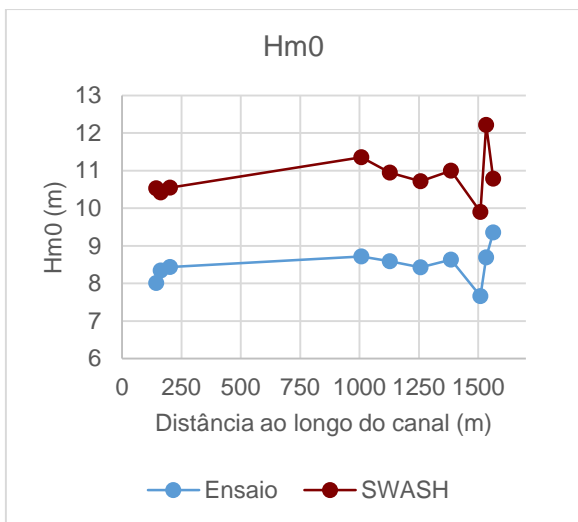


Gráfico 13 - Valores de Hm0 obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

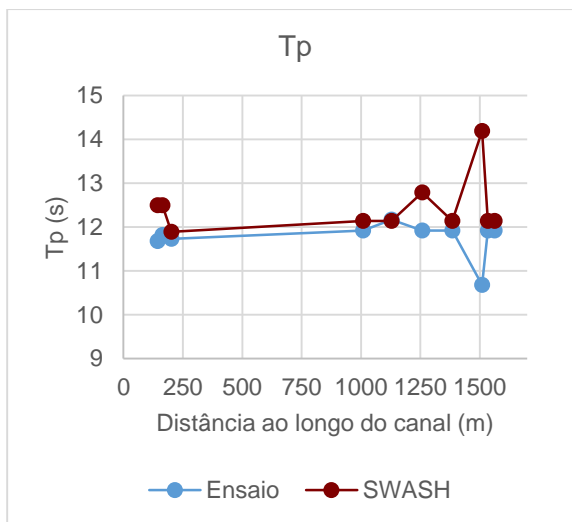


Gráfico 14 - Valores de Tp obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

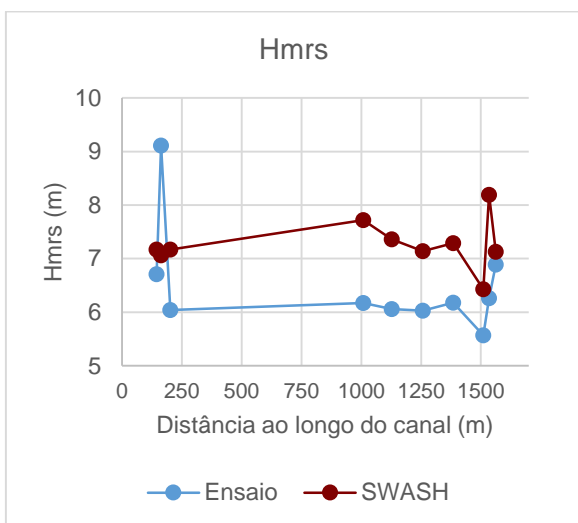


Gráfico - 15 Valores de Hmrs obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

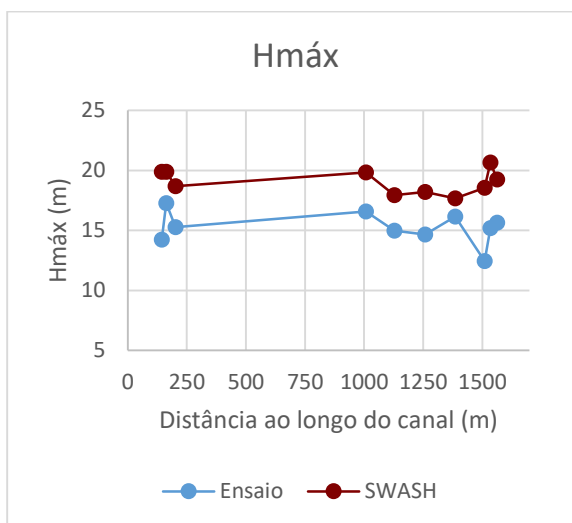


Gráfico - 16 Valores de Hmáx obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

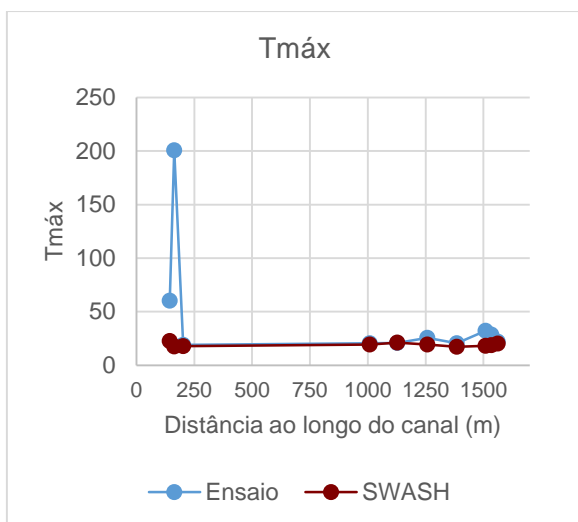


Gráfico - 17 Valores de $T_{máx}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

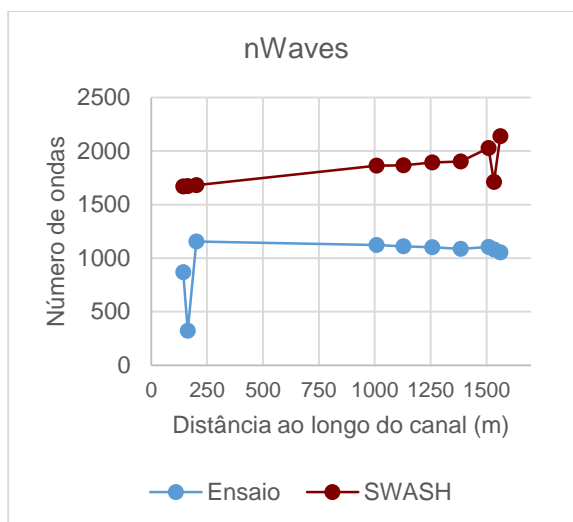


Gráfico 18 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,45.

Como mostram os gráficos anteriores, este valor de porosidade não reflete da melhor forma a agitação registada nos ensaios. A maior diferença é a observada no número de ondas que atravessam cada sonda. Os valores do período máximo são também os que mostram maior discrepância. Não é visível graficamente devido à escala, mas na tabela seguinte onde se regista a percentagem de erro, apresenta-se um erro de 90% na sonda B2.

Apesar de ser o valor de porosidade recomendada no SWASH pelo próprio manual, como foi já referido, não é indicada qualquer referência dos materiais que constituiriam o quebramar para o qual este valor seria o mais correto. Pelo menos neste caso, o valor de 0,45 não se aplica.

A Tabela 7 mostra os erros associados às diferenças registadas entre os dois modelos.

Tabela 7 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,45.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	Hmax	Tmax	nWaves
B1	31,5%	7,0%	6,9%	39,8%	62,4%	92,4%
B2	24,9%	5,8%	22,5%	15,2%	91,3%	420,9%
S1	25,0%	1,4%	18,7%	22,3%	7,2%	45,5%
L1	30,3%	1,8%	25,1%	19,5%	6,1%	66,0%
L2	27,5%	0,2%	21,5%	19,7%	1,3%	67,9%
L3	27,2%	7,3%	18,4%	24,2%	24,3%	71,6%
L4	27,5%	1,8%	18,0%	9,4%	16,8%	74,9%
L5	29,2%	32,9%	15,4%	49,0%	43,1%	83,4%
L6	40,6%	1,8%	30,8%	35,9%	34,4%	58,2%
L7	15,3%	1,8%	3,5%	23,0%	6,9%	103,0%

Dados os resultados anteriores foram estudadas porosidades superiores uma vez que os parâmetros físicos não chegam para convergir os resultados. Foram estudados de seguida os casos para porosidades de 0,5 e 0,6. O primeiro mais uma vez mostrou não ser suficiente, ocorrendo alturas de onda ainda com 2 metros a mais que o observado no modelo físico. Segue-se os resultados quando aplicada a porosidade de 0,6.

Porosidade de 0,6

Neste ponto já foi possível obter melhores resultados através do modelo numérico. Apesar da recomendação do valor de 0,45 para quebra-mares, o aumento de porosidade neste caso mostra uma melhor aproximação à realidade.

Os gráficos 19 a 24 mostram os valores obtidos com a aplicação de uma porosidade de 0,6 para uma altura significativa de 8,5 m e um período de onda de 12 s. Aplicou-se mais uma vez uma viscosidade de 0,0001 m²/s e rugosidade de fundo de 0,03 m^{1/3}/s.

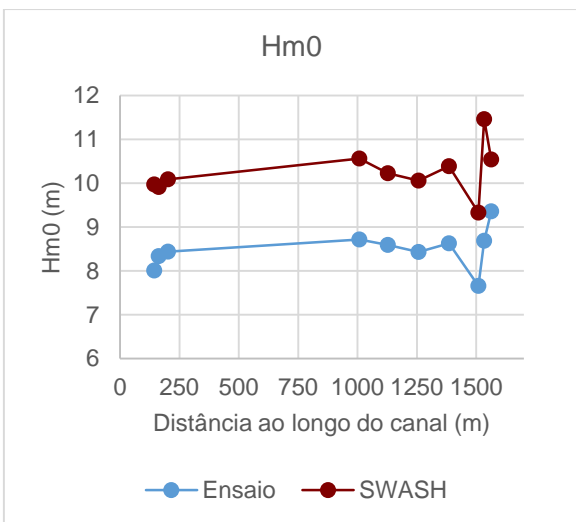


Gráfico 19 - Valores de Hm0 obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

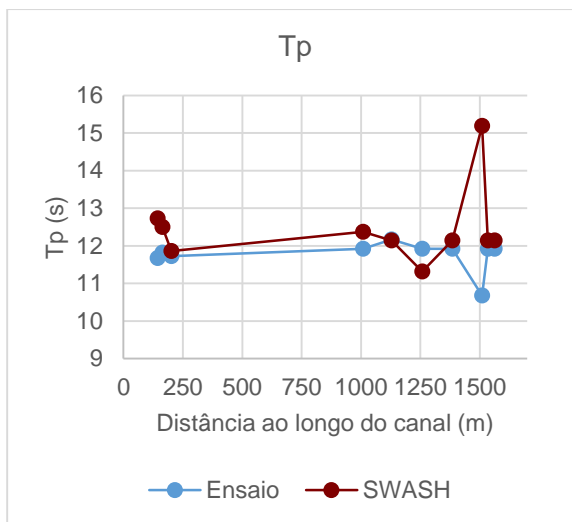


Gráfico 20 - Valores de Tp obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

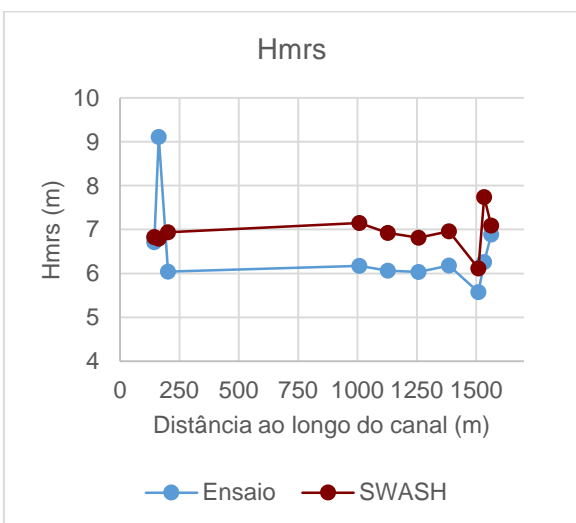


Gráfico 21 - Valores de Hmrs obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

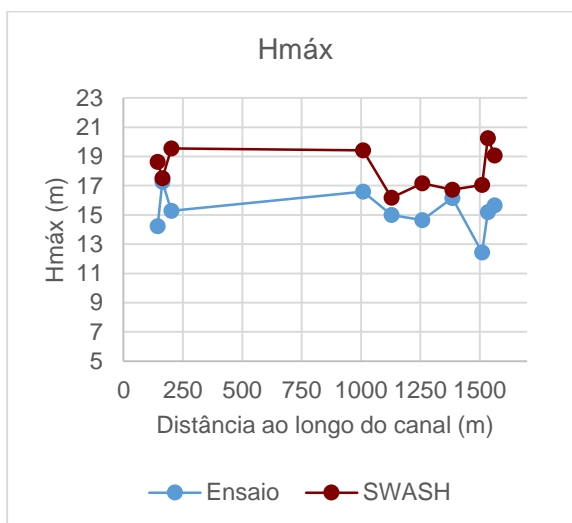


Gráfico 22 - Valores de Hmáx obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

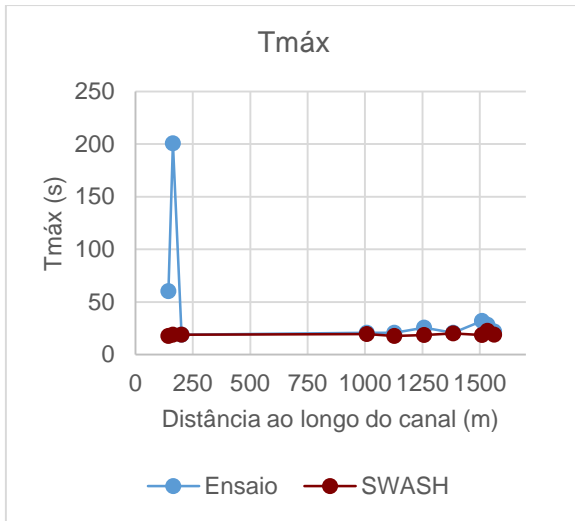


Gráfico 23 - Valores de $T_{máx}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

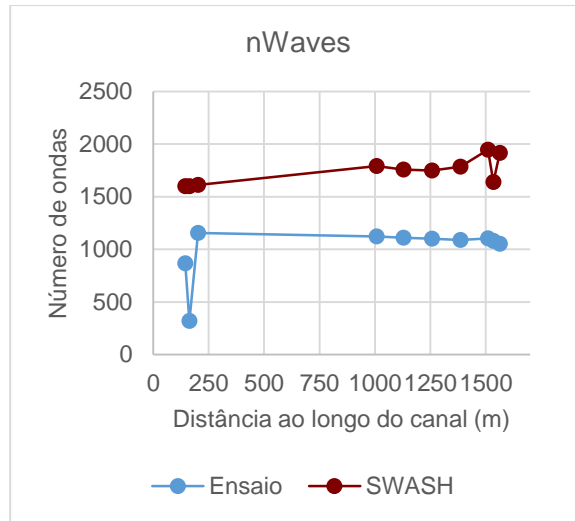


Gráfico 24 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,6.

É visível uma diminuição das alturas significativas das ondas medidas bem como das médias quadráticas comparativamente aos resultados para uma porosidade de 0,45. O número de ondas também tem um decréscimo embora muito pouco significativo. O período de onda tem pouca alteração, no entanto é visível que perto do início da camada porosa existe alguma perturbação, dado que os valores se mantêm relativamente perto dos ensaios e chegando à sonda L5 existe uma diferença de quase 5 s. Este erro poderia estar relacionado com a alteração provocada na simulação ao impor a camada porosa, no entanto as duas sondas seguintes mostram valores com pouca discrepância, havendo uma diferença de 1,6 s na sonda L7.

Os valores referentes às duas primeiras sondas parecem também não ser os mais corretos. Excetuando o caso das alturas máximas em que a segunda sonda tem uma diferença de apenas 0,24 m entre o modelo físico e o numérico, todos os outros mostram uma grande diferença entre os dois modelos. As restantes sondas apresentam uma variação semelhante entre os dois modelos, enquanto que as duas primeiras divergem bastante com um erro de 90% para $T_{máx}$ e de 366% para o número de ondas. Embora o segundo apresente grandes erros para todas as sondas, nas restantes os erros rondam entre 42% a 71%.

Pelos gráficos anteriores é visível a aproximação provocada. O número de ondas continua a ser o parâmetro com piores resultados. Mesmo verificando os outros 20 parâmetros, é de facto o que pior se relaciona.

A Tabela 8 mostra os erros obtidos na comparação com os valores obtidos no SWASH e os obtidos no modelo físico.

Tabela 8 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,6.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	E	Hmax	Tmax	nWaves
B1	17,5%	9,0%	2,5%	6,0%	30,6%	68,4%	71,1%
B2	11,6%	5,8%	29,6%	1,5%	5,8%	90,4%	366,4%
S1	11,6%	3,0%	7,5%	8,9%	21,7%	0,7%	30,9%
L1	10,7%	3,8%	7,8%	11,9%	7,2%	8,1%	42,8%
L2	9,7%	0,2%	6,1%	12,2%	14,2%	15,3%	42,5%
L3	10,6%	5,0%	6,0%	12,9%	2,3%	3,2%	42,5%
L4	11,7%	1,8%	6,6%	16,8%	2,0%	15,4%	46,1%
L5	13,2%	3,2%	5,4%	23,4%	33,0%	34,5%	54,8%
L6	18,6%	1,8%	12,0%	26,2%	23,8%	34,0%	42,6%
L7	12,7%	1,8%	6,0%	19,8%	6,2%	3,2%	52,1%

Foi testada também a porosidade de 0,7. Esta apesar de aproximar os valores entre os dois modelos mostrou-se também insuficiente. De seguida apresenta-se a análise para a porosidade de 0,8.

Porosidade de 0,8

Os valores referentes a alturas diminuíram todos assim com o número de ondas que atravessam cada um dos pontos. A diferença de alturas no entanto ainda é de mais de 1 metro.

Para uma porosidade de 0,8 com 8,5 m de altura significativa e 12 s de período de onda, obtiveram-se os valores representados nos gráficos 25 a 30.

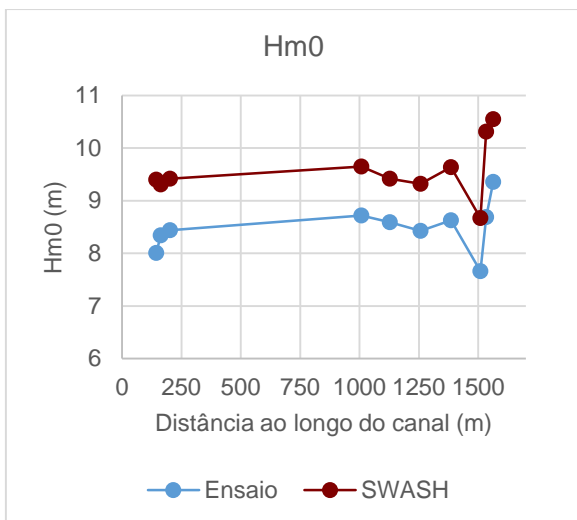


Gráfico 25 - Valores de H_{m0} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

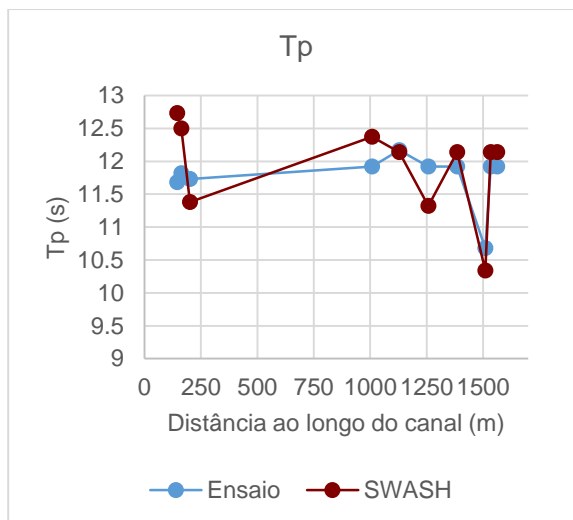


Gráfico 26 - Valores de T_p obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

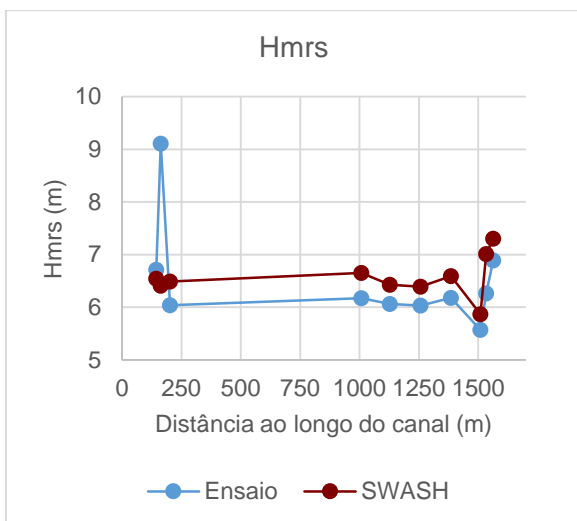


Gráfico 27 - Valores de H_{mrs} obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

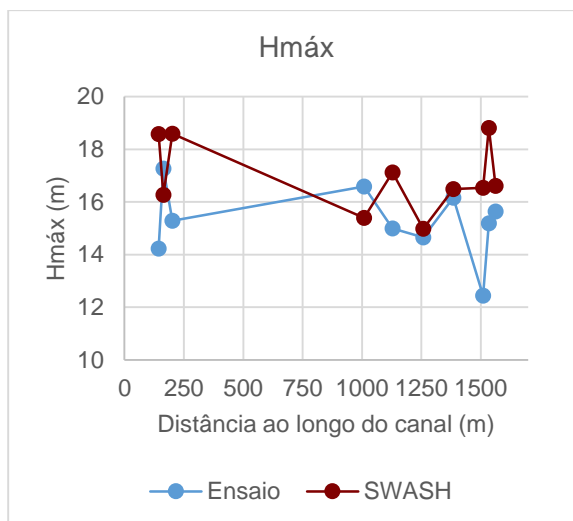


Gráfico 28 - Valores de $H_{máx}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

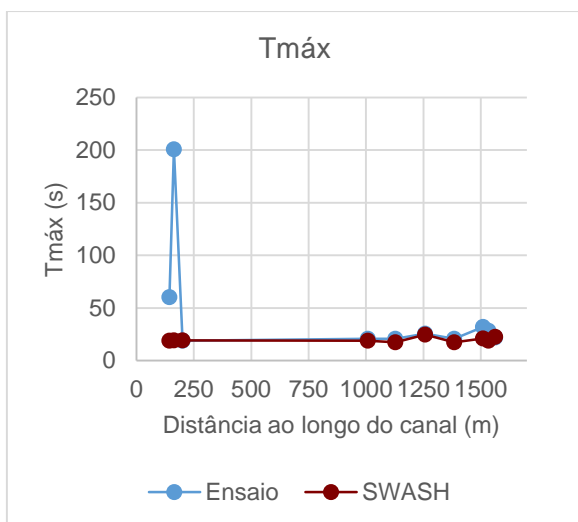


Gráfico 29 - Valores de $T_{máx}$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

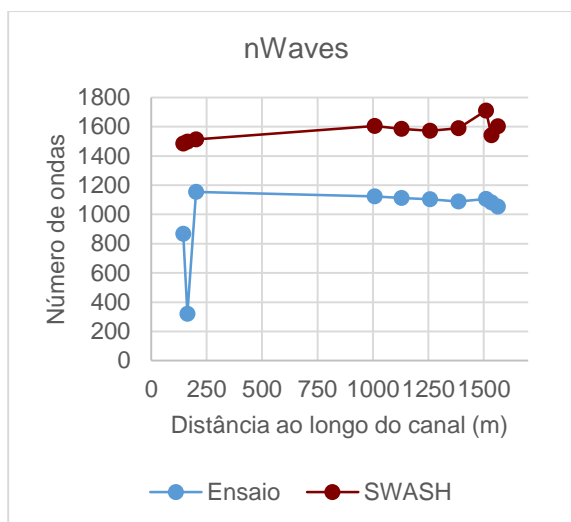


Gráfico 30 - Valores de $nWaves$ obtidos no SWASH para ondas irregulares com porosidade de 0,8.

Embora não tenha grande diferença, relativamente à porosidade anterior, foi possível diminuir os valores das alturas, aproximando aos valores dos ensaios, mas ainda com erros significativos. Ao diminuir a porosidade além de 0,8 (que significa aumentar o seu valor) os valores obtidos afastam-se mais do requerido, aumentando o erro, pelo que se manteve este valor.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, é visível que nas duas primeiras sondas, B1 e B2 os resultados do SWASH são sempre muito diferentes dos obtidos no modelo físico. Comparando os valores obtidos nos ensaios, nessas sondas, com os das restantes sondas conclui-se que poderá ter ocorrido algum erro na medição pois não existe grande variabilidade no meio que justifique as diferenças observadas entre as mesmas. Como tal, os valores dos erros calculados para estas duas sondas poderão não ser os mais corretos, uma vez que as medições poderão estar incorretas.

A Tabela 9 contém os erros associados às diferenças entre os valores obtidos no SWASH para estas condições e os dos ensaios físicos.

Tabela 9 - Erros entre os resultados dos ensaios e os obtidos no SWASH para uma porosidade de 0,8.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	Hmax	Tmax	nWaves
B1	17,4%	9,0%	2,5%	30,6%	68,4%	71,1%
B2	11,6%	5,8%	29,6%	5,8%	90,4%	366,4%
S1	11,6%	3,0%	7,5%	21,7%	0,7%	30,9%
L1	10,7%	3,8%	7,8%	7,2%	8,1%	42,8%
L2	9,7%	0,2%	6,1%	14,2%	15,3%	42,5%
L3	10,6%	5,0%	6,0%	2,3%	3,2%	42,5%
L4	11,7%	1,8%	6,6%	2,0%	15,4%	46,1%
L5	13,2%	3,2%	5,4%	33,0%	34,5%	54,8%
L6	18,6%	1,8%	12,0%	23,8%	34,0%	42,6%
L7	12,7%	1,8%	6,0%	6,2%	3,2%	52,1%

Após os testes apresentados anteriormente, os últimos resultados apresentados foram os que apresentaram menor erro. Ignorando os valores correspondentes às sondas B1 e B2 por apresentarem resultados bastante fora dos valores esperados nos ensaios, passam a ser as duas sondas mais perto da estrutura, L6 e L7, as que têm erros significativos. Neste caso, dada a proximidade da estrutura, a reflexão por esta causada pode ter influenciado os valores obtidos nessas sondas com o SWASH.

Os valores relativos aos números de ondas são os que apresentam maior discrepância entre os medidos no modelo físico e os estimados pelo SWASH de entre os 26 parâmetros observados. Apesar de manterem uma variação entre as diferentes sondas semelhante à observada nos ensaios em modelo físico, os valores têm sempre um acréscimo de pelo menos 350 ondas.

Os restantes parâmetros apresentam uma boa aproximação aos registados no modelo físico. É necessário também ter em conta que os valores foram determinados de diferentes formas, através de medições em modelo físico e através de modelos numéricos, pelo que não se esperava obter valores idênticos.

Após os testes feitos relativos à porosidade, foram estudados outros aspetos que poderiam influenciar os resultados. O facto de o tempo de simulação não ser completamente idêntico ao tempo total de duração dos ensaios físicos, poderia provocar alguma alteração nos

resultados do SWASH. Portanto foi estudado se alterando o tempo de simulação, haveria uma grande alteração dos resultados. Fez-se uma nova simulação com menos 30 minutos, 3 horas e 55 minutos, e comparou-se os resultados. Provou-se que para uma simulação tão grande como a estudada (4 horas e 25 minutos) uma redução de 30 minutos não provoca alteração alguma dos resultados. Assim, para ensaios em modelo físico que tenham sido realizados com durações diferentes, mas semelhantes aos agora considerados, não deverá ser sensível ao tempo imposto no modelo numérico.

Foi ainda estudada a aplicação de uma camada de esponja com uma dimensão igual a três vezes o comprimento de onda. No trabalho realizado por Víctor Pés, um comprimento desta dimensão conduziu a melhores resultados relativamente aos valores de caudal que ultrapassam a estrutura. Após a estrutura, a fronteira é uma fronteira fechada. Esta fronteira funciona como uma parede impermeável que reflete todo o escoamento que nela incide. Esta reflexão pode ter influência após a estrutura se não for absorvida. No SWASH esta absorção é feita pela *sponge layer*, camada de esponja. Neste trabalho, ao aumentar a camada para 558 m (três vezes o comprimento de onda), não mostrou qualquer melhoria pelo que se manteve a camada com 100 m.

Existem ainda diferenças entre os valores dos dois modelos, excluindo as duas primeiras sondas e o resultado do número de ondas. Considera-se que se obteve uma aproximação razoável entre o modelo físico e o modelo numérico, mas que ainda deverá ser melhorada.

5.3. Caudal

Os caudais foram obtidos diretamente do SWASH através de linhas específicas de comando introduzidas no ficheiro de dados. Ao longo de cada simulação foram recolhidos os ficheiros de resultados referentes aos caudais para diversos pontos situados no coroamento da estrutura e após o mesmo. O primeiro situa-se no ponto mais alto do coroamento. Existem mais três situados no talude e 5 no troço horizontal após a estrutura. Os ficheiros de resultados fornecem o caudal instantâneo ao longo de todo o tempo da simulação, referente a um ponto.

Nos ensaios físicos o caudal foi estudado através do volume total de água que passou por cima do coroamento. Para comparação com os ensaios físicos, foram determinados os

volumes totais de água que passam por um ponto ao longo de toda a simulação. A partir do SWASH obtém-se o volume à escala do protótipo, para a comparação com o valor do ensaio é afetado do fator da escala.

Foi usado como referência o valor de volume obtido no segundo ensaio feito para 8,5 m de altura significativa e 12 s de período, dado ter sido este o usado para as análises anteriores.

Tabela 10 - Volume obtido ensaio em modelo físico.

Tp (s) Hs (m) Repetição	Volume Total do Ensaio (l)
12 8,5 2	2,836

A determinação dos caudais a partir do SWASH apresentou vários problemas ao longo do estudo. Alterações feitas através da imposição de alguns parâmetros podem fazer com que os ficheiros de resultados referentes ao caudal finalizem sem qualquer valor. Esta foi a maior dificuldade apresentada.

Verificou-se que quando aplicada a viscosidade, é necessário fazer ajustes de forma a que o ficheiro de resultados apresente realmente algum resultado. De forma a obter os valores de caudal foi necessário alterar a forma como é imposta a rugosidade de fundo. Em vez de se impor a rugosidade ao longo de todo o fundo do canal, esta constante foi imposta como um ficheiro auxiliar. Aqui definiu-se a rugosidade de $0,03 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ mas apenas para o fundo impermeável. Na zona da camada porosa ficou definida como nula. Apenas desta forma foi possível obter os valores de caudal para os pontos estudados. A razão mais provável é o SWASH não ser capaz de definir a rugosidade quando a superfície não é uniforme. Desta forma, quando efetua os cálculos nessa zona, ocorre um erro na simulação e não são feitos cálculos para o caudal após a camada.

O Anexo C mostra um exemplo em que a rugosidade foi imposta como ficheiro auxiliar e não diretamente no ficheiro de dados.

Na Tabela 11 apresenta-se os valores de caudal e volumes totais obtidos para as situações estudadas anteriormente com os três valores diferentes de porosidade de 0,45, 0,6 e 0,8.

Tabela 11 - Valores de caudais obtidos nas simulações em SWASH para as porosidades aplicadas de 0,45, 0,6 e 0,8.

0,45				
Distância (m)	1651	1653	1655	Média
Qmédio SWASH (m ³ /s)	2,660	3,231	2,918	2,936
Vmédio SWASH (m ³)	42269,243	51334,170	46372,009	46658,474
Vmodelo (m ³)	16,335			
0,6				
Distância (m)	1651	1653	1655	Média
Qmédio SWASH (m ³ /s)	2,784	3,332	2,954	3,023
Vmédio SWASH (m ³)	44237,633	52940,491	46937,805	48038,643
Vmodelo (m ³)	16,335			
0,8				
Distância (m)	1651	1653	1655	Média
Qmédio SWASH (m ³ /s)	2,355162	4,032353	2,683828	3,024
Vmédio SWASH (m ³)	37423,52	64074,09	42646,03	48047,880
Vmodelo (m ³)	16,335			

Apenas a partir dos 1651 m é possível obter valores de caudal. No talude posterior ao coroamento, o SWASH não é capaz de medir o caudal que passa nesses pontos. Para a porosidade de 0,8, temos uma média de volume de água para os pontos onde este foi medido de 48047,88 m³. Os valores obtidos, independentemente da porosidade aplicada são muito superiores ao obtido no ensaio físico de 16,335 m³. Uma das razões destes resultados tem a ver com os resultados obtidos na variação da superfície livre. Logo neste ponto obteve-se valores um pouco diferentes.

Outro ponto que não parece consistente é a variação do caudal ao aplicar diferentes valores de porosidade. Seria de esperar que com a diminuição da porosidade (aumento do valor no SWASH) o caudal também aumenta-se. No entanto a variação nem sempre é crescente. Para além disso, ao longo dos pontos a variação do caudal deveria ser mínima, mas é visível que existem variações acentuadas entre os pontos.

Existe ainda a questão sobre que volume é que o SWASH está a contabilizar. Ou seja, qual o volume ao certo que passa nos pontos escolhidos para a medição. Na estrutura definida

temos a batimetria impermeável com uma camada porosa que vai dos 1600 m até perto dos 1636 m. O resto do coroamento é todo impermeável. Assim sendo, teoricamente, toda a água que chega ao coroamento, ou passa por cima dele, ou é refletida para trás. No entanto não é o que acontece.

Ao analisar a variação da superfície livre ao longo de uma simulação, não existe um único instante em que haja água a passar por cima da estrutura. No entanto existe agitação e caudal a passar na zona após o coroamento.

A Figura 25 mostra a variação da superfície livre ao longo do canal num instante da simulação.

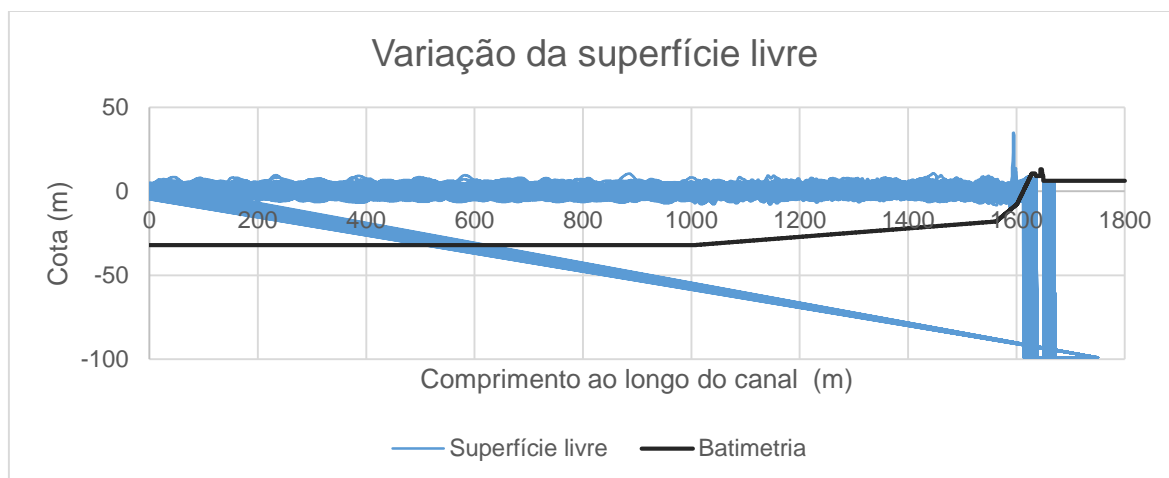


Figura 25 - Variação da superfície livre ao longo do canal.

Na Figura 26 é possível ver a variação com mais pormenor junto ao coroamento. A água atravessa a zona da camada porosa até chegar à camada impermeável. Ao atingi-la, as “quedas” que se vê é quando o SWASH não continua o cálculo e atribui o valor de -99. Mas mesmo sem haver água a passar a estrutura, existe agitação após a mesma. E assim sendo o modelo calcula o caudal que ali passa.

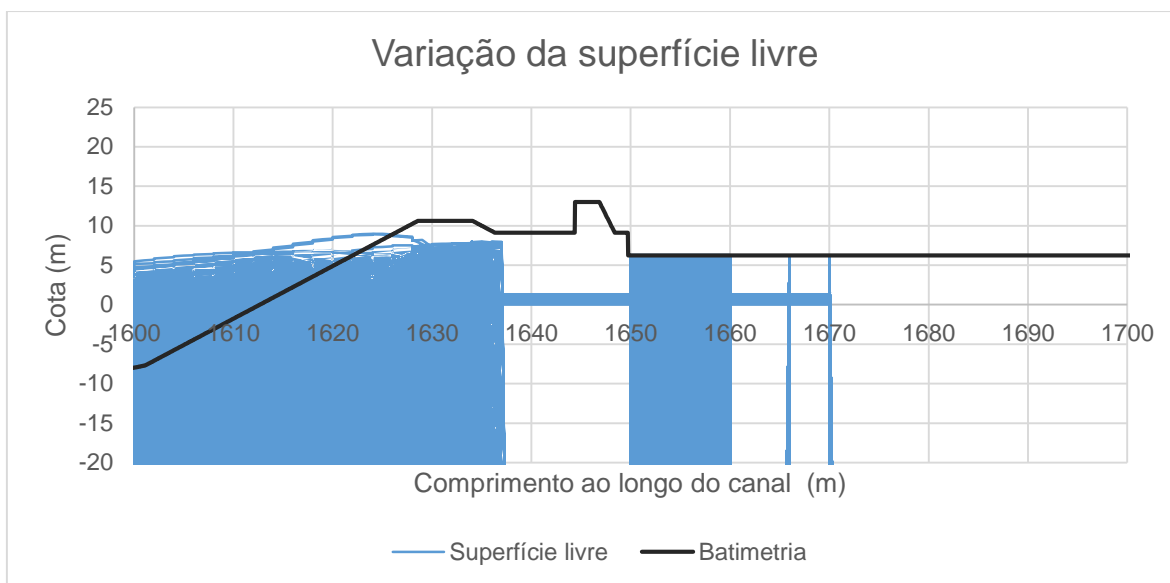


Figura 26 - Variação da superfície livre em pormenor no coroamento.

Não é possível perceber se o SWASH considera que a água que chega à estrutura a atravessa até ao outro lado. No entanto não é registado qualquer ponto em que houvesse água a atravessar a camada impermeável. A batimetria imposta como impermeável funciona como tal.

Também relativamente ao caudal que é contabilizado, o SWASH faz a sua contabilização através de uma divisão vetorial. A medição do mesmo é feita em duas direções, vertical e horizontal. No entanto, como resultados apenas é possível obter o caudal na direção x (horizontal). Na vertical nunca é contabilizado qualquer caudal. Vendo a forma como é feita a variação da superfície livre que raramente é feita perfeitamente na horizontal, existe uma parte que não está a ser considerada.

Considerando os pontos anteriores e os valores de caudal e volume total obtidos, em comparação com os do ensaio físico, considera-se que o SWASH ainda não é capaz de calcular os caudais que galgam estruturas quando lhe são aplicadas camadas porosas.

5.4. Aplicação a outras condições de agitação

Os ficheiros de dados criados neste estudo podem ser utilizados para outras condições de agitação, mas nunca diretamente. Para o fazer é sempre necessário alterar algumas linhas de comando para que se adapte à nova condição. Em primeiro lugar é necessário alterar as condições em estudo, altura significativa de onda e período de onda, que neste caso era 8,5 m e 12 s respetivamente. De acordo com o período de onda em estudo pode ser necessário alterar o número de camadas verticais. Para um período de 12 s, neste caso, uma camada foi o suficiente, mas a partir de 16 segundo, para a mesma profundidade, terão de ser utilizadas pelo menos duas camadas. O nível da superfície livre imposto inicialmente também poderá ser alterado, neste caso foi estabelecido os 2 m acima do zero hidrográfico por ter sido o mesmo imposto nos ensaios realizados em modelo físico.

Foi então realizada uma simulação para uma condição de estudo diferente de forma a tentar perceber se realmente é possível aplicar estes ficheiros de dados criados a outras situações. Foi utilizado os resultados do ensaio físico realizado em laboratório para as condições de 7,5 m de altura significativa e de 14 s de período de pico. Para adaptar o ficheiro de dados bastou alterar os dois valores anteriores. Foi feita a simulação com os parâmetros físicos aplicados aos estudos anteriores.

Os gráficos 31 a 36 mostram a comparação entre os valores obtidos no SWASH com os obtidos nos ensaios físicos realizados para 7,5 m de altura significativa e 14 s de período de onda. A linha a azul representa os valores dos ensaios físicos e os a amarelo representam os resultados do modelo SWASH.

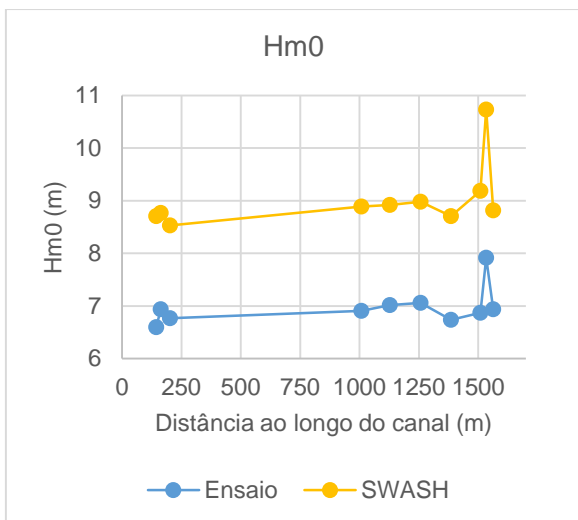


Gráfico 31 - Valores de Hm0 obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

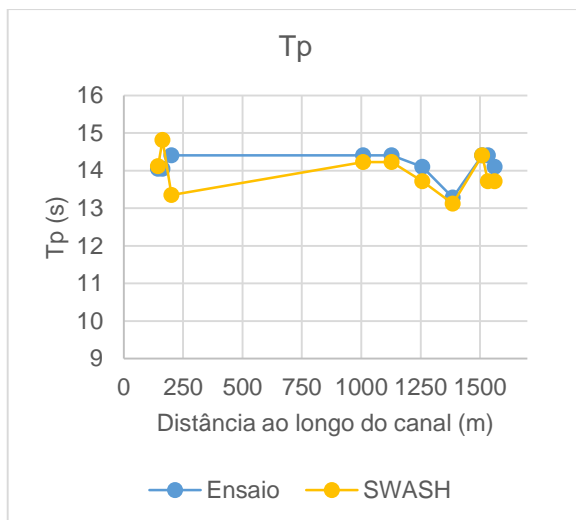


Gráfico 32 - Valores de Tp obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

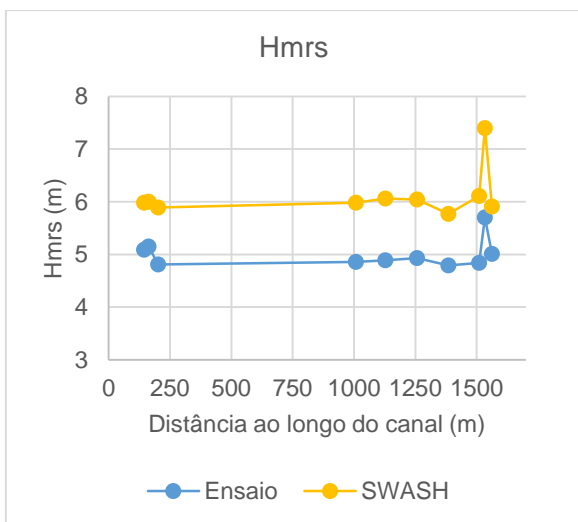


Gráfico 33 - Valores de Hmrs obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

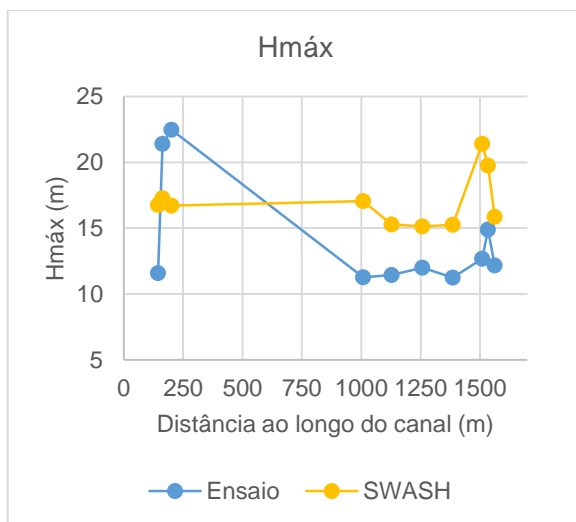


Gráfico 34 - Valores de Hmáx obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

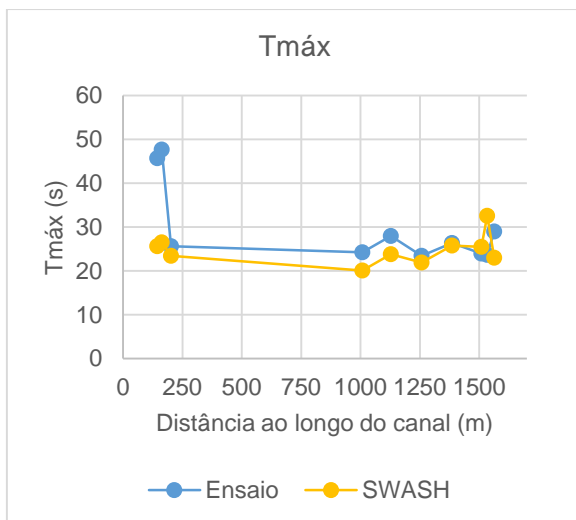


Gráfico 35 - Valores de Tmáx obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

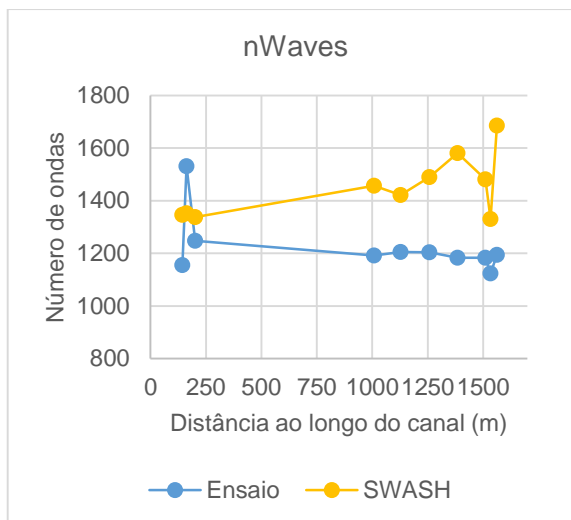


Gráfico 36 - Valores de nWaves obtidos no SWASH para 7,5m e 14s.

Alterando apenas os parâmetros representativos do segundo ensaio físico, é possível obter-se uma boa aproximação dos resultados dos ensaios. Neste caso as alturas de onda são os valores que sofrem com um maior erro associado. No entanto poderá ser possível reparar com um ajustamento no ficheiro de dados. Mais uma vez as duas primeiras sondas, B1 e B2 apresentam valores fora do esperado, uma vez que as restantes apresentam valores com uma variação ao longo do canal muito semelhante com o ensaio físico. O número de ondas tem uma melhor aproximação, onde existem pelo menos 5 sondas com diferenças inferiores a 100 ondas.

Os outros parâmetros apresentam todos uma boa aproximação, em que a diferença notória é as alturas obtidas no SWASH se encontrarem sempre acima das obtidas no ensaios.

O ficheiro de dados criado no desenvolvimento do trabalho resulta para a simulação dos resultados pretendidos. Tem no entanto de ser afinado de forma a se poder obter uma melhor aproximação.

A Tabela 12 mostra os erros associados à comparação feita para o ensaio de 7,5 m de altura significativa e 14 s de período de pico com a camada porosa com um valor de porosidade de 0,8.

Tabela 12 - Erros associados à comparação entre os resultados do SWASH e os obtidos em ensaios físicos para uma altura de 7,5m e 14s.

Sonda	Hm0	Tp	Hrms	Hmax	Tmax	nWaves
B1	32,0%	0,5%	17,5%	44,9%	44,0%	16,4%
B2	26,4%	5,5%	16,5%	19,3%	44,4%	11,7%
S1	26,0%	7,4%	22,5%	25,6%	8,6%	7,2%
L1	28,7%	1,2%	23,0%	51,5%	17,2%	22,2%
L2	27,1%	1,2%	23,9%	33,7%	14,9%	18,0%
L3	27,2%	2,7%	22,5%	26,1%	6,5%	23,8%
L4	29,2%	1,2%	20,5%	35,7%	2,1%	33,5%
L5	33,8%	0,0%	26,2%	68,8%	6,4%	25,2%
L6	35,5%	4,8%	29,8%	32,6%	37,4%	18,4%
L7	27,1%	2,7%	18,0%	30,3%	20,6%	41,2%

Foi por fim determinado o volume total resultante desta simulação. Este ensaio foi repetido três vezes. No quarto ensaio obteve-se um volume total de 0,5695 L.

Tabela 13 - Caudais e volumes obtidos no SWASH para uma altura significativa de 7,5 m e um período de pico de 14 s.

Distância (m)	1651	1653	1655	Média
Qmédio SWASH (m ³ /s)	3,974	4,815	3,460	4,083
Vmédio SWASH (m ³)	63139,63	76514,58	54986,503	64880,24
Vmodelo (m ³)	3,280			

Mais uma vez se registaram caudais bastante distante dos obtidos nos ensaios. E mais uma vez, como analisado anteriormente, não existe água a passar por cima da estrutura. Trata-se muito provavelmente de um problema no cálculo realizado pelo próprio SWASH e não dos ficheiros de dados utilizados, uma vez que esta situação se verificou quando aplicadas diferentes condições de agitação, diferentes parâmetros e comandos.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. Conclusões gerais

Esta dissertação tinha como objetivo o estudo do modelo numérico SWASH. Perceber como este funciona, como pode ser utilizado e se a sua aplicação consegue, em primeiro lugar, traduzir a agitação marítima perto da costa, e em segundo lugar, determinar os caudais galgados sobre uma estrutura.

Foram estudadas várias condições de agitação, entre elas, a aplicação de ondas regulares e irregulares variando alturas de onda significativa e períodos de pico, condições de fronteira e constantes físicas. Os resultados destes estudos foram sendo comparados com os resultados obtidos nos ensaios realizados em modelo físico no LNEC. O estudo foi dividido em duas partes. Foi primeiro analisada a agitação obtida em cada teste em comparação com o ensaio físico. Posteriormente analisou-se o caudal, que foi estudado através do volume total de água que passa sobre a estrutura.

Na primeira parte do estudo, foi possível concluir que o SWASH consegue simular a agitação marítima. Comparando os resultados de altura de onda, período de pico, altura média quadrática, entre outros referidos anteriormente, é possível verificar que os resultados do SWASH se aproximam dos obtidos nos ensaios físicos. A variação dos valores obtidos em cada sonda é consistente com a dos ensaios. Existe no entanto alguma diferença entre os valores. É possível que seja possível acrescentar ou alterar algum parâmetro de forma a que estes resultados sejam mais favoráveis.

Na realidade existem duas camadas porosas no local onde a camada foi colocada. No entanto dado os resultados obtidos com a aplicação da primeira camada, correspondendo à camada de tetrápodes, no que respeita ao caudal que passa sobre a estrutura, a aplicação de uma segunda camada não conduziria a melhores resultados. Verificou-se então, para a situação em estudo, que a camada imposta correspondente a uma camada de tetrápodes com 2 m de altura corresponde no SWASH a uma porosidade de 0,8.

A segunda parte do estudo foi a que apresentou mais problemas. Contudo foi possível determinar os caudais galgados na estrutura para várias condições de agitação.

Comparam-se os caudais obtidos para cada valor de porosidade estudado. Os valores obtidos não são de todo próximos dos obtidos nos ensaios físicos. Esperava-se à partida que fossem inferiores devido à forma como o SWASH calcula o caudal, no entanto obtiveram-se valores muito superiores. Ao analisar a variação da superfície livre ao longo de toda a simulação é possível verificar não existe água a passar por cima da estrutura. Como estado inicial foi sempre definido que a água estaria em repouso, altura a 0 m (ZH) e com velocidade nula. Esta condição é aplicada em todo o domínio, incluindo a água que se encontra após a estrutura. Não passando água por cima da estrutura, o que se encontra após a mesma não tem perturbação. No entanto, pouco depois de a primeira onda atingir a estrutura, é possível registar agitação, e por isso caudal a passar nas sondas (colocadas no SWASH) após o coroamento.

Este modelo numérico apresenta ainda grandes problemas de estabilidade. A sua aplicação não é fácil e é frequente ocorrerem erros nas simulações. A informação existente sobre a ocorrência de erros ou mesmo a aplicação de comandos não são muito claros. O próprio manual apresenta algumas incoerências e falta informação que deveria ajudar na compreensão do funcionamento do modelo. O tempo de simulação é mais um ponto negativo, quando é necessário esperar várias horas para alterar apenas um valor de um parâmetro.

Concluiu-se que o SWASH é capaz de produzir simulações da agitação da superfície livre com alguma coerência. No entanto no cálculo dos caudais ainda apresenta vários erros.

6.2. Desenvolvimentos futuros

A diferença entre os valores obtidos, principalmente relativamente às alturas de onda, poderão ser diminuídas através da diminuição da altura da superfície livre. Foram aplicados os parâmetros de viscosidade e rugosidade de fundo que provocam uma diminuição da altura da superfície livre, mas que se mostraram insuficientes. Um aumento da viscosidade aproximaria bastante os valores entre os modelos, no entanto não seria um valor real. O modelo numérico SWASH tem uma grande variedade de parâmetros. É possível que exista outro fator que não tenha chegado a ser estudado que ajude neste ponto. Neste caso, os valores dos caudais poderão também aproximar-se mais dos obtidos nos ensaios físicos.

7. BIBLIOGRAFIA

- Allsop, N.W.H. – International Conference on Coastline, structures and breakwaters 2005 in London UK on 20 – 22 April 2005. 2005.
- Buckley, Mark; Lowe, Ryan; Hansen, Jeff - Evaluation of nearshore wave models in steep reef environments. *Ocean Dynamics*. Vol. 64. nº 6 (2014). pág. 847-862.
- Dorn, William. V. – *Oceanography and Seamanship*. Cornell Maritime Press Inc.,U.S. 1974
- Fabião, João - Estabilidade Hidráulica do Manto de Quebra-mares de Taludes - Estudo em Modelo Físico. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (IST). Dezembro 2012.
- Fortes C. J.E.M.; Reis M. T.; Poseiro P.; Santos J. A.; Garcia T.; Capitão R.; Pinheiro L.; Reis R.; Craveiro J.; Lourenço I.; Lopes P.; Rodrigues A.; Sabino A.; Araújo J. P.; Ferreira J. C.; Silva S. F.; Raposeiro P.; Simões A.; Azevedo E. B.; Reia F. V.; Rodrigues M. C.; Silva C. P. – Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: O Sistema HIDRALERTA. 2016.
- General Schroedel, J. – Staying Afloat in the Azores – A publication of the Society of American Military Engineers for TME online magazine. 17 de Setembro 2012.
- Gladiador, O. – Direção de Ridley Scott; Produtoras Scott Free Productions, Dreamworks, Universal Pictures. 2000.
- Hasselmann, Klaus; Barnett, TP; Bouws, E; Carlson, H; Cartwright, DE; Enke, K; Ewing, JA; Gienapp, H; Hasselmann, DE; Kruseman, P - Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutches Hydrographisches Institut, 1973.
- Hughes, Steven – The tma shallow-water spectrum description and applications. – US Army Corps of Engineers. Dezembro 1984.

Instituto Hidrográfico. Divisão de Oceanografia. CLIMMAT – Relatório Resumo Tempestade de 26/27 de Fevereiro de 2005.

Martins, Rita – Avaliação da hidrodinâmica e dos níveis de galgamento na praia do furadouro. Análise comparativa da situação atual e com a construção de quebra-mares destacados. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP). Junho 2016.

Mellink, Bart - Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater. 2012.

Neves, D. R.; Santos, J. A.; Reias, M. T.; Fortes, C. J.; Simões, A.; Azevedo, E. B.; Rodrigues, M. C. – 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. 12(3):291-312. 2012.

Pèrez, Meritxell Salas - Overtopping over a real rubble mound breakwater calculated with Swash. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Julho 2014.

Pés, Víctor Martinez - Applicability and Limitations of the swash model to predict wave overtopping. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona Outubro 2013.

Pés, Víctor Martinez – Contacto feito em Agosto de 2016.

Poseiro P.; Sabino A.; Fortes C. J.; Reis M. T.; Rodrigues A. – Aplicação do Sistema HIDRALERTA de Previsão e Alerta de Inundações: Caso de Estudo da Praia da Vitória. 2015.

Relatório 218/2011 – NPE, Observação Sistemática de obras marítimas da região autónoma dos Açores – Porto da Praia da Vitória – Ilha terceira, Campanha de observação visual efectuada em 2011 – LNEC.

Resumo não técnico – Empreitada para a renovação e ampliação da marginal da Praia da Vitória, Estudo de impacte ambiental. Junho 2007.

Rocha, T.; Reis, M. T.; Conceição, F; Pinto, F. T.; Santos, J. A.; Neves, D.; Portela, L. – Influência da variação do nível de maré na avaliação do risco de galgamento na baía da Praia da Vitória, Terceira, Açores – 7^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. 2012.

Rodrigues, Joana – Avaliação do risco e aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) na avaliação das consequências de galgamento em zonas costeiras e portuárias – Aplicação ao porto de Ponta Delgada. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP). Julho 2014.

Suzuki, Tomohiro - Introduction to SWASH model: theory and hands-on session, Ourense. 9 de Maio 2014.

Suzuki, Tomohiro – Contacto feito de Abril a Julho de 2016.

Suzuki *et. al* - The applicability of SWASH model for wave transformation and wave overtopping: A case study for the Flemish coast. Liège, Belgium. 14 – 17 Novembro 2011.

Strauss, Benjamin – Mapping choices – Carbon, climate, and rising seas. Our global legacy. Novembro 2015

Team, S.W.A.S.H. - SWASH User Manual version 3.14. (2015).

ANEXOS

Anexo A: Exemplo de um ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas regulares com fundo impermeável.

Anexo B: Exemplo de um ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável.

Anexo C: Exemplo de um ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas regulares com camada permeável.

Anexo D: Valores dos parâmetros utilizados para a comparação com o ensaio físico para 8,5 m de altura significativa e 12 s de período de pico.

Anexo A: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas regulares com fundo impermeável

```
$*****HEADING*****
PROJ 'AIF' 'A13'
$
$*****MODEL INPUT*****
$Inicial setting
SET level=0 depmin=0.001
MODE NONST ONED
$
$VERT 2
$
$Computacional grid
CGRID 0. 0. 0. 1705 0. 3410 0
$
$Bottom read file
INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 34100 0 0.05 0
READINP BOTTOM 1. 'aifBAT.bot' FREE
$
$Initial state
INIT ZERO
$
$Wave conditions
BOU SIDE W CCW BTYPE WEAK SMOO 40 SEC UNIF REG 6 12.
BOUndcond SIDE E CCW BTYPE RADIATION
SPON EAST 6.
$
$Numerics
NONHYDrostatic
$DISCRET UPW UMOM H BDF
$DISCRET UPW WMOM H BDF
$DISCRET CORRdep MINMOD
$
$Physics
FRIC MANNING 0.019
VISC 0.01
BRE 0.6 0.3
$
TIMEI METH EXPL 0.1 0.3
```

```
$***** OUTPUT REQUESTS *****  
$  
QUANTI HSIG SETUP dur 20 min  
$  
GROUP 'LINE' 1 3410 1 1  
TABLE 'LINE' HEAD 'a13.tbl' TSEC DIST WATL BOTLEV QMAG OUTPUT 000000.000  
20.00 SEC  
$  
POINTS 'SONDAS' FILE 'Sondas.loc'  
TABLE 'SONDAS' HEADER 'Result.Sondas13.tbl' XP HSIG BOTLEV WATL QMAG  
$  
TEST 1,0  
COMPUTE 000000.000 0.01 SEC 003000.000  
STOP
```

Anexo B: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas irregulares com fundo impermeável

```
$*****HEADING*****  
PROJ 'AIF' 'B2'  
$  
$*****MODEL INPUT*****  
$Inicial setting  
SET level=2 depmin=0.001  
MODE DYN ONED  
$  
VERT 1  
$  
$Computacional grid  
CGRID 0. 0. 0. 1705 0. 3410 0  
$  
$Bottom read file  
INPGRID BOTTOM REG 0. 0. 0. 34100 0 0.05 0  
READINP BOTTOM 1. 'aifBAT.bot' FREE  
$  
$Initial state  
INIT 0  
$  
$Wave conditions  
BOUnd SHAP JON 3.3 SIG PEAK  
BOUndcond SIDE W CCW BTYPe WEAK CON SPECT 10 14  
$BOUndcond SIDE E CCW BTYPe RADIATION  
$  
$Numerics  
NONHYDrostatic  
$  
$Physics  
VISC 0.0001  
FRIC 0.03  
BRE 0.6 0.3  
$  
TIMEI METH EXPL 0.1 0.5
```

```
$***** OUTPUT REQUESTS *****  
$  
QUANTI HSIG SETUP dur 30 min  
$  
GROUP 'LINE' 1 3410 1 1  
TABLE 'LINE' HEAD 'B2.tbl' TSEC DIST WATL BOTLEV OUTPUT 000000.000 20.00 SEC  
$  
POINTS 'SONDAS' FILE 'SondasEns.loc'  
TABLE 'SONDAS' HEADER 'Result.SondasB2.tbl' XP HSIG BOTLEV WATL  
$  
TEST 1,0  
COMPUTE 000000.000 0.01 SEC 003600.000  
STOP
```

Anexo C: Ficheiro de dados usado no programa SWASH para ondas irregulares com camada porosa

```
$*****HEADING*****  
PROJ 'AIF' 'Cm3'  
$  
$*****MODEL INPUT*****  
$Inicial setting  
SET level=2 depmin=0.001  
  
MODE NONSTATIONARY ONEDIMENSIONAL  
  
VERT 1  
  
$Computacional grid  
CGRID 0. 0. 0. 1750 0. 3500 0  
  
$Bottom read file  
INPGRID BOTTOM REG 0. 0. 0. 35000 0 0.05 0  
READINP BOTTOM -1. 'Bat_imp.bot' FREE  
  
INPGRID POROSITY REG 0. 0. 0. 35000 0 0.05 0  
READINP POROSITY 1. 'porosidade.n' FREE  
  
INPGRID PSIZE REG 0. 0. 0. 35000 0 0.05 0  
READINP PSIZE 1. 'psize.n' FREE  
  
INPGRID HSTRUCTURE REG 0. 0. 0. 35000 0 0.05 0  
READINP HSTRUCTURE 1. 'hEstrutura.n' FREE  
  
INPGRID FRICTION REG 0. 0. 0. 35000 0 0.05 0  
READINP FRICTION 1. 'Fric.n' FREE  
  
$Initial state  
INIT 0
```

\$Wave conditions

BOU SHAP JON 3.3 SIG PEAK

BOU SIDE W CCW BTYPE WEAK CON SPECT 8.5 12 90 0 4 HR

BOU SIDE E CCW BTYPE RADIATION

SPONGelayer Rlght 100

\$Numerics

NONHYDROSTATIC BOX PREC ILU

\$

\$Physics

VISC 0.0001

DISCRET UPW NONE

DISCRET UPW UMOM V NONE

\$

TIMEI 0.01 0.25

\$***** OUTPUT REQUESTS *****

QUANTI HSIG SETUP dur 200 MIN

POINT 'B1' 144 0

TABLE 'B1' HEAD 'B1.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.17 SEC

POINT 'B2' 163.2 0

TABLE 'B2' HEAD 'B2.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.17 SEC

POINT 'S1' 201.6 0

TABLE 'S1' HEAD 'S1.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L1' 1008 0

TABLE 'L1' HEAD 'L1.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L2' 1128 0

TABLE 'L2' HEAD 'L2.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L3' 1257.6 0

TABLE 'L3' HEAD 'L3.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L4' 1384.8 0

TABLE 'L4' HEAD 'L4.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L5' 1509.6 0

TABLE 'L5' HEAD 'L5.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L6' 1533.6 0

TABLE 'L6' HEAD 'L6.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'L7' 1562.4 0

TABLE 'L7' HEAD 'L7.tbl' TSEC WATL OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'CC' 1645 0

TABLE 'CC' HEAD '1645.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C1' 1646 0

TABLE 'C1' HEAD '1646.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C2' 1647 0

TABLE 'C2' HEAD '1647.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C3' 1648 0

TABLE 'C3' HEAD '1648.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C4' 1649 0

TABLE 'C4' HEAD '1649.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C5' 1650 0

TABLE 'C5' HEAD '1650.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C6' 1651 0

TABLE 'C6' HEAD '1651.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C7' 1652 0

TABLE 'C7' HEAD '1652.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C8' 1653 0

TABLE 'C8' HEAD '1653.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C9' 1654 0

TABLE 'C9' HEAD '1654.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

POINT 'C10' 1655 0

TABLE 'C10' HEAD '1655.tbl' TSEC WATL DISCH OUTPUT 000000.000 0.14 SEC

GROUP 'LINE' 1 3500 1 1

TABLE 'LINE' HEAD 'surface.tbl' TSEC DIST WATL BOTLEV DISCH OUTPUT 000000.000
5.00 SEC

TEST 1,0

COMPUTE 000000.000 0.005 SEC 042450.000

STOP

Anexo D: Valores dos parâmetros obtidos nos ensaios realizados em modelo físico para uma altura significativa de 8,5m e 14s

Sonda	xP	Hm0	Tp	Tm01	Tm_10	Hrms	E	s_om	s_op
B1	144	8,01	11,68	8,65	11,85	6,71	3,49	0,069	0,038
B2	163,2	8,34	11,82	4,12	11,35	9,11	3,27	0,314	0,038
S1	201,6	8,44	11,73	10,27	12,22	6,04	3,5	0,051	0,039
L1	1008	8,72	11,92	10,69	12,78	6,17	3,6	0,049	0,039
L2	1128	8,59	12,17	10,68	13,01	6,06	3,7	0,048	0,037
L3	1257,6	8,43	11,92	10,55	13,28	6,03	3,81	0,049	0,038
L4	1384,8	8,63	11,92	10,67	14,03	6,18	3,98	0,049	0,039
L5	1509,6	7,66	10,68	10,41	18,04	5,57	5,43	0,045	0,043
L6	1533,6	8,69	11,92	10,93	17,47	6,26	4,93	0,047	0,039
L7	1562,4	9,36	11,92	10,72	15,96	6,89	4,34	0,052	0,042

Sonda	s_o	Hs	H1/10	H1/20	H1/50	H1/100	Hmax	H5%	Hrms
B1	0,037	8,95	10,86	11,75	12,69	13,24	14,23	10,69	6,71
B2	0,041	11,44	13,19	14,13	15,46	16,51	17,27	12,79	9,11
S1	0,036	8,4	10,43	11,3	12,47	13,24	15,28	10,05	6,04
L1	0,034	8,62	10,91	12,01	13,38	14,33	16,59	10,48	6,17
L2	0,033	8,46	10,54	11,38	12,31	13,04	14,99	10,22	6,06
L3	0,031	8,48	10,79	11,8	13,07	13,64	14,65	10,38	6,03
L4	0,028	8,62	10,79	11,76	12,91	13,6	16,16	10,54	6,18
L5	0,015	7,78	9,68	10,44	11,28	11,76	12,44	9,4	5,57
L6	0,018	8,85	11,13	12,14	13,27	13,9	15,19	10,7	6,26
L7	0,024	9,67	11,8	12,64	13,58	14,15	15,64	11,54	6,89

Sonda	Hmean	Ts	T1/10	T1/20	T1/50	T1/100	Tmax	Tm	nWaves
B1	6,27	14,36	32,14	39	47,84	52,21	60,28	13,76	868
B2	8,77	52,86	115,73	140,43	164,29	184,29	200,74	37,28	321
S1	5,44	11,41	14,49	15,23	16,26	17,01	19,12	10,34	1155
L1	5,53	11,72	15,06	15,92	17,14	18,25	20,65	10,65	1123
L2	5,45	11,69	15,06	15,88	17,06	17,96	20,78	10,58	1112
L3	5,39	11,67	15,07	16,09	17,53	19	25,63	10,68	1103
L4	5,55	11,89	15,23	16,08	17,17	18,08	20,65	10,82	1088
L5	5,02	12,15	16,3	17,62	19,47	21,1	32,15	10,82	1105
L6	5,57	12,64	16,36	17,62	19,71	22,03	28,54	11,05	1081
L7	6,2	11,83	15,55	16,77	18,7	19,97	21,89	11,19	1053