



Modelação não linear e não hidrostática de ondas de superfície em fundos de variação rápida - Modelo SWASH

Ana Rita Esteves de Araújo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor António Alberto Pires Silva

Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Juri

Presidente: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Vogal: Professor Doutor António Alberto Pires Silva

Vogal: Doutora Liliana Vieira Pinheiro

Outubro 2016

Agradecimentos

Esta dissertação representa o início de uma nova fase na minha vida, que só foi possível devido ao apoio de um conjunto de pessoas.

Em primeiro lugar um agradecimento bastante especial ao Professor António Pires Silva, que permitiu que este projeto acontecesse acreditando em mim e nas minhas capacidades. Agradeço ainda toda a sua disponibilidade, saber, visão e entrega a este projeto.

Ao LNEC, por me permitir desenvolver este projeto em especial Engenheira Juana Fortes por toda a sua disponibilidade e conhecimento e ao Engenheiro Pedro Poseiro.

Aos meus colegas e amigos do curso, João Abrantes, João Caeiro, Marta Carrilho, Teresa Lima, Carolina Figueiredo, Carlos Costa, Pedro Moreira, Maria do Rosário Figueiredo e João Barroso, sem os quais chegar aqui não teria sido possível e que tornaram toda esta experiência muito melhor.

Aos meus amigos de longa data, Tiago Curado, Beatriz Rodrigues e Beatriz Lopez que testemunham e acompanham mais um capítulo da minha vida, tendo mais uma vez um papel fundamental no mesmo.

Aos meus amigos, Catarina Pinheiro, Vanessa Matos, Tomás da Câmara Pestana, Sara Nascimento, Bernardo Machado, Diogo Poças, Filipa Santos, Filipa Ruela, Francisco Mendes, Gonçalo Henriques e Maria Lagos que são cada um à sua maneira um exemplo, uma segunda família e um grande apoio.

Ao Guilherme Mendes, pelo enorme carinho, paciência, apoio e por tornar todos os meus problemas mais fáceis.

Por último, mas sem dúvida o agradecimento mais importante, à minha família em especial aos meus pais, Isabel Araújo e Luís Araújo, por serem os melhores pais que alguém poderia desejar, por me terem dado a oportunidade de estudar nesta instituição, pelo apoio incondicional, mas principalmente por toda a formação e valores que me transmitiram sem os quais eu nunca seria feliz. Ao meu irmão, Miguel Araújo, sem o qual a minha vida não estaria completa.

Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo a avaliação do desempenho do programa SWASH em fundos de variação rápida. O modelo SWASH apoia-se nas equações de águas pouco profundas não lineares (NLSW), com uma equação adicional de balanço da quantidade de movimento na vertical que permite estimar uma pressão não hidrostática. O programa é indicado para fenómenos característicos da zona costeira, que podem incluir a propagação da agitação marítima sobre fundos de variação rápida.

Para realizar este estudo foram utilizados um conjunto de ensaios laboratoriais levados a cabo no LNEC, que visavam avaliar a viabilidade e a eficácia da implantação de um recife artificial na praia de São Pedro do Estoril. Os recifes artificiais têm sido utilizados em vários locais com os mais diversos intuitos, incluindo a melhoria das condições de rebentação e consequente modificação da zona de “surf”.

De acordo com as experiências em laboratório, as simulações numéricas contemplaram condições de agitação marítima características da zona, nas situações com e sem recife. Nas simulações realizadas apenas foram consideradas ondas regulares.

Os resultados, quer qualitativamente na forma de gráficos de barras, quer quantitativamente recorrendo a indicadores estatísticos, mostram um bom ajuste e a capacidade do programa SWASH para simular a propagação das ondas de superfície nas condições especificadas no objetivo principal.

Palavras chave: SWASH, Recife submerso, Modelação não Hidrostática, ensaios laboratoriais

Abstract

The present work aims to evaluate the performance of the SWASH model in a rapidly varying bathymetry. The SWASH model is based on the nonlinear shallow water equations (NLSW), with the addition of a momentum balance equation in the vertical direction which allows to estimate the non-hydrostatic pressure. The program is suitable for the representation of characteristic phenomena at the coastal zone. Therefore, it's expected to perform well in the situation referred above.

The laboratory experiments performed at LNEC (National Civil Engineering Laboratory), were used. They aimed to assess the feasibility and effectiveness of the implementation of an artificial reef at São Pedro do Estoril beach. The artificial reefs have been used in various locations and with a number of purposes, including the improvement of surf conditions and the consequent modification of the surf zone.

As in the laboratory experiments, numerical simulations were design for the sea conditions characteristics of this zone and were conducted with and without the reef. At this stage only regular waves were used in the simulations.

According to the main objective of this dissertation - evaluate the SWASH behavior in a rapidly varying bathymetry - the results obtained showed that the SWASH program can be applied to a rapidly varying bathymetry.

Key words: SWASH, Artificial Reef, Non-Hydrostatic modelling, laboratory experiment

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organização do documento	7
2. Modelo SWASH.....	9
3. Caso de estudo - Ensaio experimental do recife artificial na praia de S. Pedro do Estoril.....	13
3.1. Descrição sucinta do local.....	13
3.2. Ensaio em laboratório.....	14
3.2.1. Instalação experimental	14
3.2.2. Características dos ensaios experimentais	16
3.2.3. Parâmetros característicos de rebentação	18
4. Configuração do modelo	21
4.1. Condições de fronteira	21
4.2. Atrito e Viscosidade.....	22
5. Análise de resultados	25
5.1. Introdução.....	25
5.2. Simulações numéricas sem recife.....	27
5.3. Simulações numéricas com recife.....	31
5.4. Linha de rebentação.....	35
5.5. Análise de sensibilidade	41
6. Conclusões.....	45
Referências bibliográficas	47
ANEXOS.....	i
Anexo A	i
Anexo B	iv
Anexo C	v
Anexo D	vi
Anexo E	vii
Anexo F	ix
Anexo G.....	xi

Anexo Hxii

Índice de Figuras

Figura 1.1- Distribuição, esquemática, da energia em função da frequência/período. (Kinsman, 1965)	1
Figura 1.2- "Reef Balls" a) Instalação do recife; b) Fixação da vida marinha no recife	2
Figura 1.3- "Beachsaver Reef" a) Funcionamento dos Modulos do recife; b) Módulo do recife (www.cee514coastalanalysisfloridakeys.weebly.com/beachsaver-model.html)	2
Figura 1.4- Localização do recife, Cable Station	3
Figura 1.5- Recife de Cable Statiton (http://www.surfermag.com)	4
Figura 1.6- Sacos de Geotêxtil a) Sacos sem areia (www.ww2.technologyreview.com) b) Recife no local (www.savetrestles.soup.io)	4
Figura 1.7- Recife Narrowneck a) Projeto; b) Vista Aérea	5
Figura 3.1- a) Localização da praia de S. Pedro; b) Praia de S. Pedro; c) Localização do recife	13
Figura 3.2- Batimetria adjacente à praia de S. Pedro do Estoril	14
Figura 3.3 -Tanque de ondas irregulares, a) Aspeto geral; b) Batimetria, retirado de Fortes et al. (2008)	14
Figura 3.4 - Geometria do Recife (Fortes et al., 2008)	15
Figura 3.5-Quadricula implementada, a) Esquema; b) Pormenor; c) Sondas implementadas na quadrícula; d) Tanque com a quadrícula;	15
Figura 3.6- Localização das sondas. a) Posição das sondas; b) Posição das sondas num dos ensaios;	17
Figura 3.7- Exemplos de resultados; a) Altura de onda significativa nos pontos de medição; b) Índices de agitação nos pontos de medição	18
Figura 3.8- Esquema ilustrativo, retirada de Walker (1974)	19
Figura 4.1- Domínio de estudo	21
Figura 5.1 - Localização das Sondas, Ensaio Laboratorial	26
Figura 5.2- Localização das Sondas sobre o Recife	27
Figura 5.3 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 1: sem recife, direção de onda 220°, altura de onda 3 m	28
Figura 5.4- Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 2: sem recife, direção de onda 220°, altura de onda 2 m	28
Figura 5.5 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 3: sem recife, direção de onda 235°, altura de onda 3 m	29
Figura 5.6 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 4: sem recife, direção de onda 235°, altura de onda 2 m	29
Figura 5.7 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 5: com recife, direção de onda 220°, altura de onda 3 m	32
Figura 5.8- Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 6: com recife, direção de onda 220°, altura de onda 2 m	32

Figura 5.9 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 7: com recife, direção de onda 235°, altura de onda 3 m.....	33
Figura 5.10 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 8: com recife, direção de onda 235°, altura de onda 2 m.....	33
Figura 5.11 - Domínio com as direções de onda 220° e 235°e área em análise.....	35
Figura 5.12 - Alinhamentos auxiliares para a obtenção dos perfis: a) Direção 220°, b) Direção 235°	36
Figura 5.13 – Perfis para a determinação da linha de Rebentação - Cenário 1.....	37
Figura 5.14 - Linha de Rebentação - Cenário 1.....	38
Figura 5.15 - Perfis para a determinação da linha de Rebentação - Cenário 5	39
Figura 5.16 - Linha de Rebentação - Cenário 5: a) SWASH; b) Laboratório.....	40

Índice de Tabelas

Tabela 3.1-Condições de agitação dos ensaios realizados.....	16
Tabela 3.2- Relação entre o ângulo na linha de rebentação e a dificuldade da onda, adaptado de Antunes (2009)	19
Tabela 3.3-Metodologia de Battjes (1974) classificação do tipo de onda segundo o número de Iribarren	20
Tabela 5.1- Cenários analisados.....	25
Tabela 5.2 - Estatísticas das comparações para a situação sem recife.....	30
Tabela 5.3 - Estatísticas de comparação para a situação com recife	34
Tabela 5.4 - Análise de Sensibilidade - Atrito Valores <i>S.I</i>	41
Tabela 5.5 - Análise de Sensibilidade - Atrito Valores RMSE	41
Tabela 5.6 - Análise de Sensibilidade - Viscosidade Valores <i>S.I</i>	42
Tabela 5.7 - Análise de Sensibilidade - Viscosidade Valores RMSE	42

Lista de Símbolos

Definição	Símbolo
Aceleração da gravidade	g
Altura da onda ao largo	H_0
Altura de onda	H
Celeridade	c
Coefficiente de Manning	n
Componente da velocidade (x) integradas na vertical	u
Componente da velocidade (y) integradas na vertical	v
Componente da velocidade (z)	w
Comprimento de onda	L
Comprimento de onda ao largo	L_0
Coordenadas Horizontais	x,y
Declive	m
Elevação da superfície livre em relação ao nível médio	η
Fator de resistência	c_f
Frequência angular temporal	ω
Massa Volúmica	ρ
Número de Iribarren	ξ_0
Número de onda	k
Período	T
Potencial do campo de velocidades	$\phi(x, z, t)$
Pressão	p
Pressão Hidrostática	p_h
Pressão não hidrostática normalizada por ρ	q
Profundidade do fundo	d
Profundidade total ($d+ \eta$)	h
Tempo	t
Tensão tangencial horizontal turbulenta	τ_{ij}
Viscosidade turbulenta	ν_t

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Existem diversos tipos de ondas de superfície que se diferenciam pela natureza dos agentes perturbadores e das forças restauradoras da posição de equilíbrio. A Figura 1.1 apresenta uma classificação, esquematizada, das ondas de superfície.

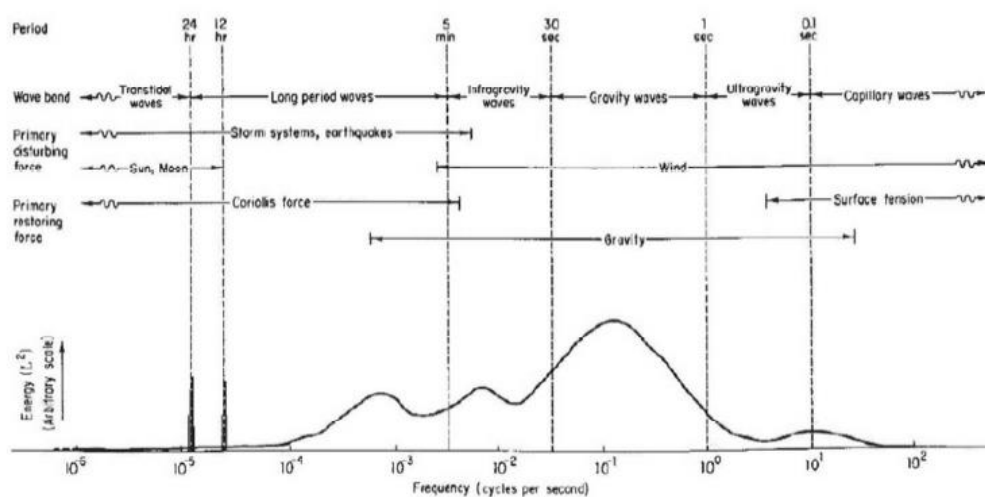


Figura 1.1- Distribuição, esquemática, da energia em função da frequência/período. (Kinsman, 1965)

As referidas ondas manifestam-se na superfície de separação de dois fluidos de densidades diferentes como a água e o ar. Em geral, a perturbação induzida à superfície tem uma extensão limitada na coluna líquida. A exceção ocorre em águas pouco profundas. Apesar da escala arbitrária do eixo das ordenadas, a Figura 1.1 mostra que a classe das ondas de superfície geradas pelo vento, e cuja força restauradora da posição de equilíbrio/repouso é a gravidade, está associada aos fenómenos mais energéticos. São estas as ondas objeto de estudo nesta dissertação. Têm uma gama de variação, típica, de períodos entre 1 s e 25 s.

Um recife artificial é uma estrutura submersa construída para diversos propósitos, como a proteção costeira, a criação de espaços de mergulho, pois favorece a fixação da fauna e flora marítima, e o melhoramento das condições de rebentação. No presente estudo procura-se analisar o comportamento de um recife artificial que vise este último objetivo.

A utilização de recifes artificiais que proporcionam um melhor enquadramento para a prática de *surf* têm uma história relativamente recente, tendo sido introduzidos pela primeira vez em 1999 em Cable Station, Austrália (Bancroft, 1999). Em Portugal, apesar de já terem sido realizados diversos estudos com este fim, ainda não foi construído nenhum recife artificial com o objetivo primeiro de melhorar as condições da prática de *surf*.

Apresentam-se de seguida alguns exemplos de soluções e metodologias para concretizar a implementação de recifes artificiais. Um dos métodos utilizados tem a designação

de "Reef Balls". Estas são constituídas por semiesferas de betão achatadas, ocas e com vários orifícios para facultar a circulação de vida marinha (Figura 1.2). O betão utilizado incorpora microsíllica que confere maior resistência, aproxima o *pH* do betão ao da água do mar e diminui a abrasão do mesmo. Estas características permitem uma maior durabilidade do recife e a fixação mais facilitada de vida marinha. As dimensões deste tipo de esferas situam-se entre os 0,3x0,45 m e os 3x2,5 m (Loomis, 2003).

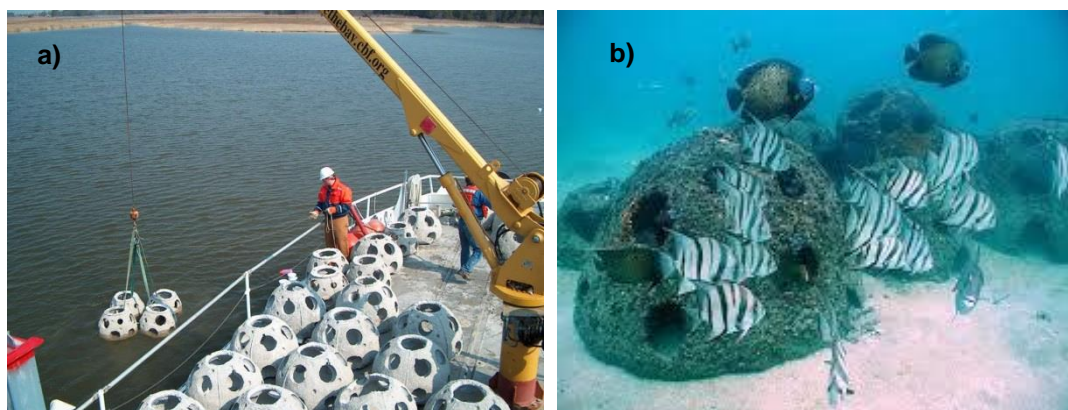


Figura 1.2- "Reef Balls" a) Instalação do recife; b) Fixação da vida marinha no recife

Outra solução utilizada é o "Beachsaver Reef". Tratam-se de módulos de betão pré-fabricados, com cerca de 21 toneladas, que podem ser adicionados a outros módulos para aumentar a estabilidade (Figura 1.3 b)). A função deste tipo de estrutura é diminuir a altura da onda que incide na orla costeira, diminuindo, assim, a energia incidente (Figura 1.3 a)).

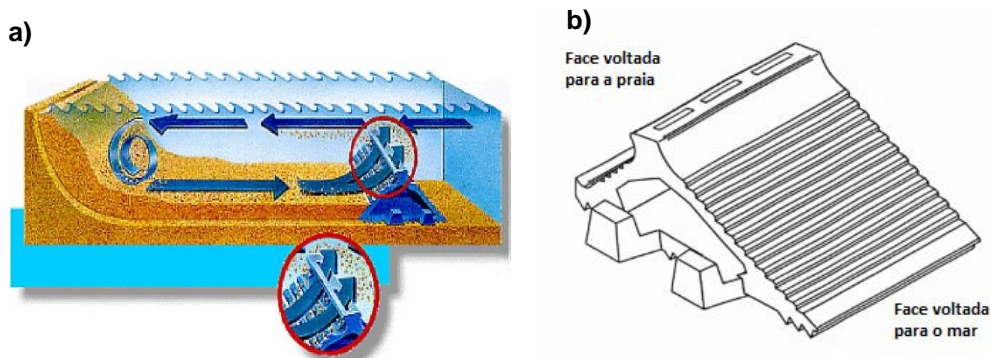


Figura 1.3- "Beachsaver Reef" a) Funcionamento dos Módulos do recife; b) Módulo do recife (www.cee514coastalanalysisfloridakeys.weebly.com/beachsaver-model.html)

Como acima referido, o primeiro recife artificial construído com o intuito da melhoria das condições de *surf* foi o recife artificial de Cable Station na cidade de Perth, na costa oeste da Austrália (Bancroft,1999). O desenvolvimento da modalidade, com aumento da procura por parte de novos praticantes, trouxe a necessidade de locais adicionais para este desporto. Perante esta situação, o governo local, pressionado pela comunidade *surfista*, nomeou em 1988 uma comissão para analisar a viabilidade de implementação de um recife artificial em

Cable Station. Os estudos levados a cabo indicaram que este recife poderia ter outras funções para além da criação de um novo local de *surf*, como a proteção costeira e providenciar um local de mergulho para os dias em que as condições não fossem favoráveis à prática de *surf*. A praia de Cable Station, representada na Figura 1.4, foi o local escolhido para a construção do recife devido à conjugação de vários fatores: linha de costa consolidada e estável, área não propícia a pesca e banhos (o que diminui o conflito entre utilizadores), acesso fácil à praia, existência de um recife natural, condições de agitação marítimas apropriadas e possibilidade de construção de infraestruturas inerentes à prática de *surf*.

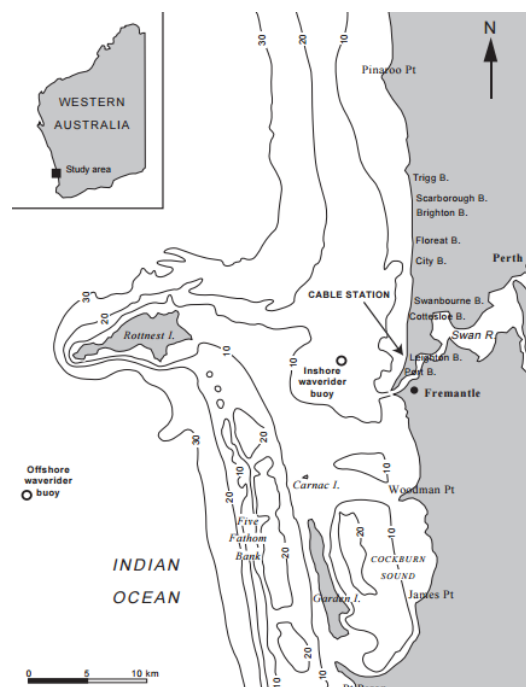


Figura 1.4- Localização do recife, Cable Station

O recife foi construído entre Fevereiro e Dezembro de 1999 (Bancroft, 1999) e é constituído por blocos de granito dispostos em forma de um bumerangue (Figura 1.5) assentes sobre o recife natural, perfazendo um volume total de cerca de $5000 m^3$. Estes blocos foram ainda cobertos por areia para preencher os vazios entre eles.

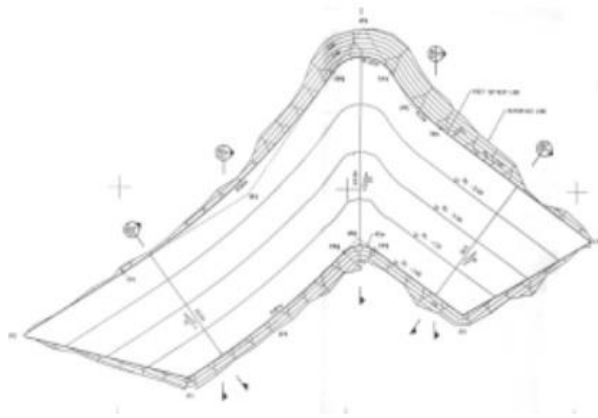


Figura 1.5- Recife de Cable Station (<http://www.surfermag.com>)

O recife tem tido um comportamento muito positivo uma vez que o tipo de rebentação está de acordo com os parâmetros projetados e é *surfável* mais dias do que os previstos. (Pattiaratchi, 2003).

Para concluir esta breve resenha menciona-se uma aplicação ligada à tecnologia de geotêxteis. Esta solução tem sido utilizada, especialmente, para a construção de recifes com o intuito de melhorar as condições de *surf* (Figura 1.6). Os sacos (ainda vazios) são transportados para o local para serem preenchidos com uma mistura de água do mar e areia do local. Este método tem vantagens, quando comparado com os restantes, uma vez que a areia utilizada é a do local, o que reduz os custos (logística e transporte) e também diminui o impacto ambiental caso estes rompam. Os sacos de geotêxtil são menos duros que os materiais associados a outras soluções, tornando-os mais seguros para os utilizadores. São também mais fáceis de remover, no caso de o recife não apresentar a eficácia desejada.

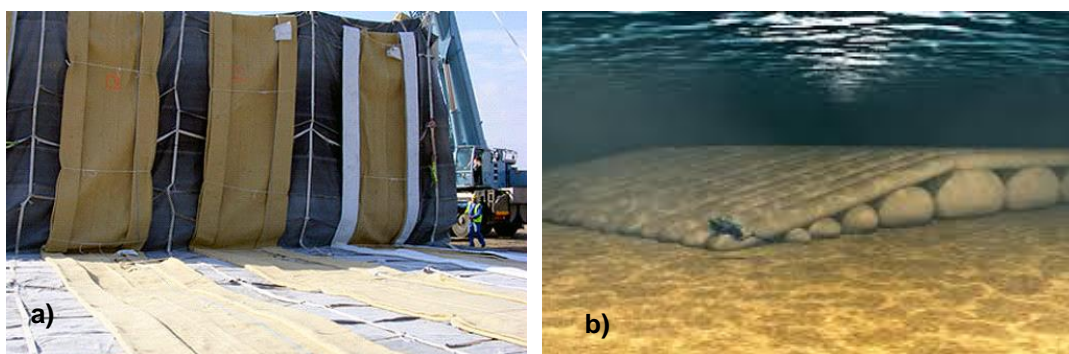


Figura 1.6- Sacos de Geotêxtil a) Sacos sem areia (www.ww2.technologyreview.com) b) Recife no local (www.savetrestles.soup.io)

Narrowneck, situada na costa Leste da Austrália (*Gold Coast*), sempre foi uma cidade com grandes problemas ao nível da erosão costeira devido às tempestades de Inverno

que arrastam a areia da praia para águas profundas e ao desenvolvimento e expansão da cidade que levou à destruição das dunas, dificultando a fixação de areia nas praias. Estima-se que cerca de 400 a 500 m^3 de areia eram, anualmente, perdidos por erosão na costa (Loomis, 2003). Esta situação, para além da perda de terreno na costa, punha em risco algumas estruturas junto à mesma. A primeira solução experimentada para o problema foi a alimentação da praia com areia. Tal revelou-se inviável e levou à procura de uma solução mais definitiva e eficiente. O grande potencial turístico e de prática de *surf* da zona conduziram à procura de uma solução versátil que mitigasse os problemas de erosão e melhorasse as condições de *surf*, e com efeitos negativos mínimos na paisagem. Surgiu assim um projeto de construção de um recife multifuncional (Figura 1.7) a cerca de 500 m da costa, com dimensões aproximadas de 350 x 610 m^2 . A estrutura de base era constituída por 400 sacos de geotêxtil preenchidos com areia do local. A obra teve um custo aproximado de 1,5 milhões de dólares. Este valor compara com a estimativa do retorno de 2,2 milhões de dólares com a realização de apenas uma competição de surf (Loomis, 2003).



Figura 1.7- Recife Narrowneck a) Projeto; b) Vista Aérea

O mencionado projeto teve início em Agosto de 1999 e foi concluído em Dezembro de 2000. Em 2001 e 2002 foi reforçado com mais sacos geotêxtis para continuar a garantir o bom funcionamento do recife. Esta solução não só controlou a erosão da costa, objetivo principal do recife, como proporcionou um local de surf, permitiu a fixação de vida marinha e criou espaços de mergulho o que conduziu a uma melhoria da economia local e à dinamização da região.

A iniciativa que foi objecto de avaliação na dissertação está relacionada com o intuito de melhorar as condições de surf na praia de S. Pedro do Estoril. Como pré-requisito, a Câmara de Cascais encomendou um estudo ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil para avaliar a viabilidade e a eficácia da implantação de um recife artificial na referida praia. O estudo foi realizado em 2008, em ambiente laboratorial, recriando as condições marítimas da zona em estudo. Os resultados foram bastante favoráveis (Fortes et al., 2008), mas, até à data, o recife não chegou a ser construído.

O conjunto de ensaios experimentais associados a esta avaliação de viabilidade proporcionaram o enquadramento base de referência quantitativa para a verificação do modelo SWASH feita nesta dissertação. A implementação de uma estrutura submersa na zona de aproximação à praia originou uma variação de fundo relativamente rápida. Esta circunstância é suscetível de constituir um teste interessante para as capacidades e características do SWASH. Este programa foi desenvolvido por uma equipa da Technical University Delft – Holanda e seguiu o quadro de pressupostos do modelo SWAN.

Zijlema et al. (2011) apresentam uma síntese do desenvolvimento do SWASH com a formulação matemática, opções de discretização e aproximações numéricas, domínio de aplicabilidade e uma recolha criteriosa e completa de exemplos prévios de verificação e validação com recurso a soluções analíticas, ensaio laboratoriais e dados de campo. Neste trabalho está também disponível um conjunto de referências bibliográficas que, entre outros objetivos, contextualizam a introdução da correção não hidrostática da pressão e de uma componente dispersiva nas equações do movimento em aproximação de águas pouco profundas.

1.2. Objetivos

O objetivo da presente dissertação é avaliar o comportamento do modelo SWASH em fundos de variação rápida, utilizando como comparação os resultados laboratoriais obtidos pelo LNEC. O conjunto dos ensaios analisaram a viabilidade de implantação de um recife artificial na praia de S. Pedro do Estoril. Tal como nos ensaios laboratoriais, foi avaliado o desempenho do programa para a situação com e sem recife.

O propósito central do trabalho desdobrou-se em tarefas parcelares:

- Pesquisa bibliográfica;
- Estudo do programa SWASH - instruções, procedimentos e opções de configuração;
- Avaliação do ensaio laboratorial realizado no LNEC - condições dos ensaios realizados e respetivos resultados;
- Aplicação do modelo numérico ao ensaio laboratorial nas suas várias condições de agitação e à variação do perfil do fundo;
- Análise comparativa das simulações numéricas;

1.3. Organização do documento

A dissertação está dividida em seis capítulos, acrescidos das referências bibliográficas e anexos.

O primeiro capítulo apresenta um enquadramento da problemática em estudo. No segundo capítulo procede-se a uma descrição breve do programa SWASH, principais características e equações governativas. No terceiro capítulo é descrito o ensaio laboratorial realizado no LNEC que serve como referência para a presente dissertação. No quarto capítulo são enumeradas e fundamentadas as várias opções tomadas para a definição do modelo numérico, constituindo a base para o quinto capítulo onde são analisados os resultados obtidos pelo SWASH e comparados com os resultados laboratoriais. No sexto capítulo são apresentadas as conclusões.

2. Modelo SWASH

A estrutura matemática do modelo SWASH assenta nas equações não lineares de águas pouco profundas (*Nonlinear Shallow Water – NLSW*). Trata-se de uma aproximação às equações do movimento de fluidos incompressíveis com a decomposição de Reynolds para os campos das variáveis cinemáticas e aplicação do operador média temporal (*Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS*). A aproximação, apropriada para escoamentos com superfície livre, desenvolve-se através de uma integração na vertical ao longo da coluna líquida, dos diferentes termos das equações, ponderada pela profundidade total desta última (Trigo-Teixeira, 1994).

Esta operação aplica-se às componentes horizontais da equação de balanço da quantidade de movimento e à equação de conservação de massa com condições de fronteira no fundo e na superfície livre. A componente vertical é aproximada pelo equilíbrio hidrostático, o que permite introduzir a elevação da superfície livre nas componentes horizontais do gradiente da pressão. A restrição para o equilíbrio na vertical, que exclui acelerações verticais, é equivalente à aproximação de ondas longas. Nesta configuração, as velocidades verticais são estimadas através da equação da continuidade. Os modelos puramente hidrostáticos são utilizados em maiores escalas espaciais, como a propagação da onda de maré.

Para alargar o âmbito de aplicação do SWASH para menores escalas espaciais, em particular a propagação da agitação marítima em aplicações de pequena escala costeira, é necessário modificar as condições de balanço da componente vertical quantidade de movimento. No caso, levantar o constrangimento imposto pela igualdade entre o gradiente vertical da pressão e a força da gravidade. O primeiro passo é decompor a pressão total na soma de duas componentes, uma de carácter hidrostática (p_h) e outra não hidrostática (q)

$$p = p_h + q, \quad (2.1)$$

verificando-se

$$p_h = \rho g(\eta - z). \quad (2.2)$$

A dedução das equações de base do modelo SWASH, na versão de uma camada, que é equivalente a um modelo integrado na vertical (2DH), é análoga à acima descrita. Apenas se faz uso de (2.1) e (2.2), o que faz intervir a elevação da superfície livre (η) nas componentes horizontais do gradiente da pressão e a introdução de um novo termo. Este novo termo vai garantir o carácter não hidrostático do modelo e controlar as suas características de dispersão.

O resultado está apresentado no conjunto de equações seguintes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} &= \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} &= \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

τ_{ij} representa o tensor das tensões tangenciais horizontais de origem turbulenta (com $i, j = 1, 2$), c_f é o factor de resistência, h a profundidade total, resultante da soma da elevação da superfície livre η com a profundidade do nível de repouso d , q é pressão não hidrostática normalizada por ρ e u e v as componentes horizontais do vetor velocidade integradas na vertical.

(Zijlema et al., 2011), referência que se seguiu de perto neste capítulo, mostram quais as aproximações a adotar no cálculo do integral, ao longo da profundidade da coluna líquida, das componentes horizontais do gradiente da pressão não hidrostática ($\partial q/\partial x$ e $\partial q/\partial y$) que figuram em (2.3). Estas aproximações visam assegurar um melhor ajuste numérico à relação de dispersão (Anexo A).

O factor de resistência relaciona-se com o coeficiente de Manning (n) pela seguinte equação

$$c_f = \frac{n^2 g}{h^{1/3}} \quad (2.4)$$

O modelo de fecho da turbulência baseia-se na hipótese de Boussinesq e consequente introdução de uma viscosidade turbulenta (ν_t). Como tal, o tensor das tensões tangenciais horizontais de origem turbulenta tem a seguinte expressão

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.5)$$

O modelo SWASH opera também em versão multicamada. As equações apresentadas são aplicáveis camada a camada (o domínio não é integrado na vertical mas sim discretizado). Esta funcionalidade é possível com uma equação de balanço da quantidade de movimento na vertical, que é integrada explicitamente. Uma das características mais marcantes e originais do SWASH reside no esquema numérico escolhido para a referida integração. No estudo associado a esta dissertação de mestrado só se usou a versão 2DH.

Conclui-se este capítulo com um sumário dos processos, particularmente importantes em zonas costeiras, tidos em conta no modelo:

- Empolamento
- Refração
- Difração
- Dispersão em frequência
- Interações não-lineares onda-onda
- Rebentação
- Atrito no fundo
- Reflexão parcial e transmissão
- Espreadimento e retorno
- Reflexão parcial e transmissão
- Interação onda-corrente
- Correntes induzidas pelas ondas
- Amortecimento das ondas, devido à vegetação aquática
- Interação onda-estrutura

3. Caso de estudo - Ensaio experimental do recife artificial na praia de S. Pedro do Estoril

3.1. Descrição sucinta do local

A praia de S. Pedro do Estoril, cuja localização e enquadramento está esquematizada na Figura 3.1, pertence ao Concelho de Cascais, tem uma extensão de areal de 400 m e uma largura variável entre 25 a 35 m. Foram analisadas várias localizações para o recife e a escolhida está representada na Figura 3.1 c). A escolha desta zona prende-se com o objetivo de criar uma nova zona de *surf* não alterando as condições existentes.



Figura 3.1- a) Localização da praia de S. Pedro; b) Praia de S. Pedro; c) Localização do recife

As condições de agitação marítima incidentes na área de estudo (período, altura e direção média das ondas geradas pelo vento foram definidas por Fortes et al. (2008).

A batimetria apresenta uma diminuição gradual de profundidade na direção normal à costa, sem variações bruscas. Como consequências, as curvas batimétricas orientam-se quase paralelas à linha de costa (Figura 3.2).

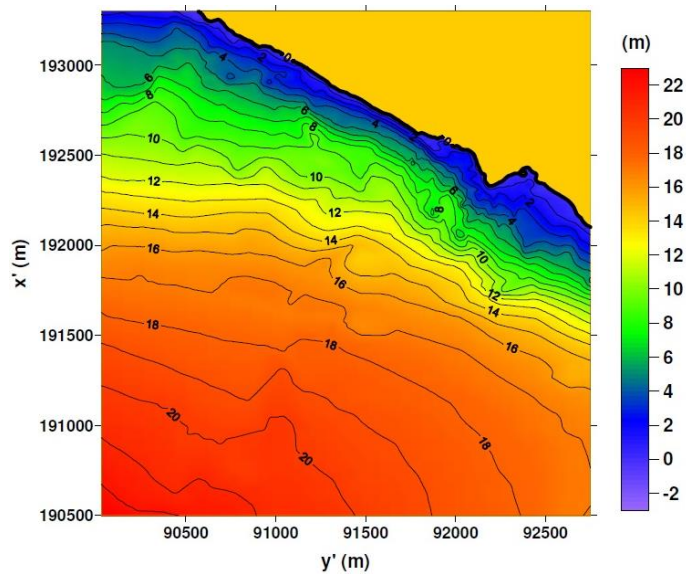


Figura 3.2- Batimetria adjacente à praia de S. Pedro do Estoril

3.2. Ensaios em laboratório

3.2.1. Instalação experimental

Os ensaios foram realizados no tanque de ondas irregulares com 600 m^2 (30 m de comprimento por 20 m de largura) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil no ano de 2008, Figura 3.3 a). O gerador de ondas irregulares utilizado tem uma pá com 6 m de largura e 0,8 m de altura que pode ser orientada de acordo com a direção de incidência desejada.



Figura 3.3 -Tanque de ondas irregulares, a) Aspetto geral; b) Batimetria, retirado de Fortes et al. (2008)

O ensaio foi realizado à escala geométrica de 1:30 e seguiu-se a lei de semelhança de Froude para a definição das restantes variáveis. A batimetria está representada desde a cota de fundo -10 metros até à costa, Figura 3.3 b).

As características geométricas reais do recife implementado encontram-se na Figura 3.4

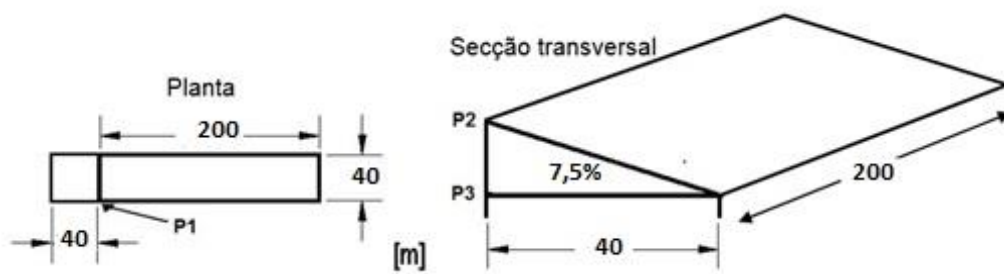


Figura 3.4 - Geometria do Recife (Fortes et al., 2008)

O recife foi implementado numa quadrícula 1mX1m, Figura 3.5 a), para controlo do ensaio, tanto relativamente à posição das sondas, Figura 3.5 c), como do próprio recife Figura 3.5 b).

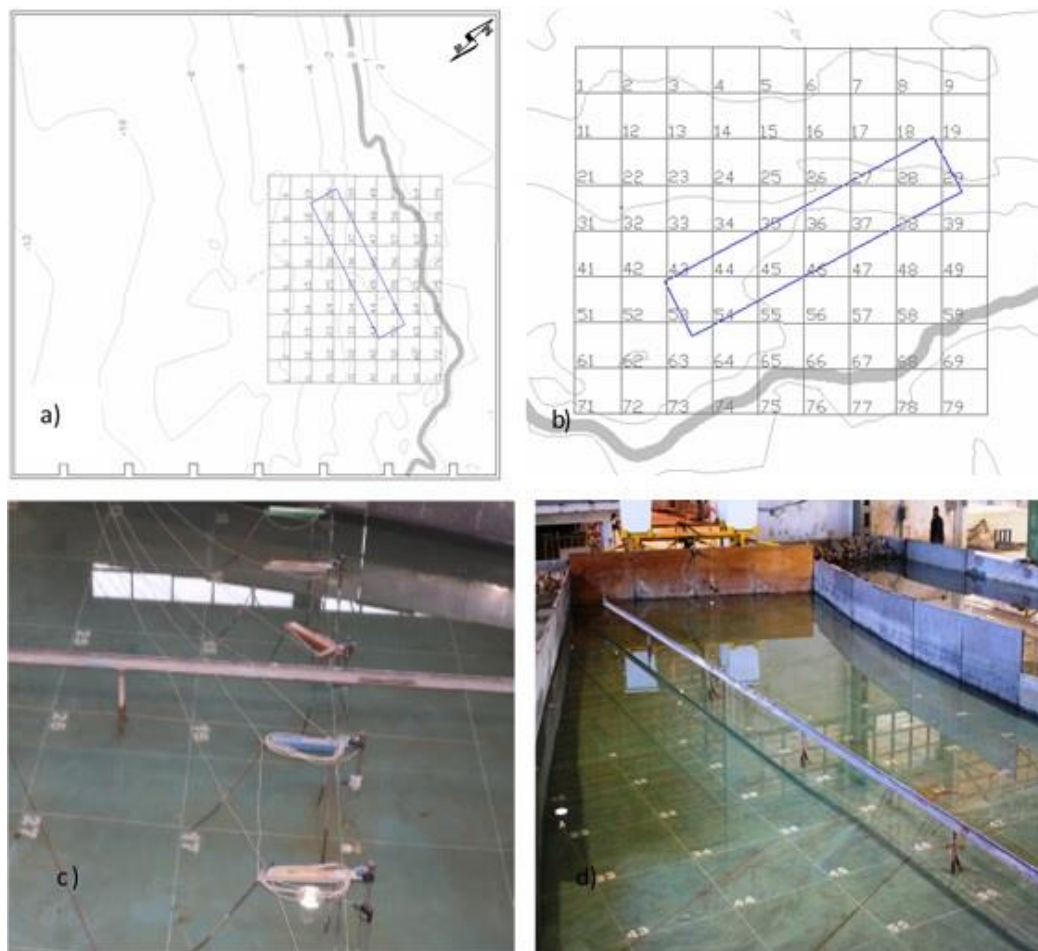


Figura 3.5-Quadrícula implementada, a) Esquema; b) Pormenor; c) Sondas implementadas na quadrícula; d) Tanque com a quadrícula;

3.2.2. Características dos ensaios experimentais

Os ensaios foram realizados com e sem o recife artificial, ficando esta última como situação de referência. Para cada um destes casos foram adotadas diferentes condições de agitação incidente associadas ao regime médio de agitação da zona e também situações menos características do local, com períodos maiores, mas interessantes do ponto de vista dos surfistas.

Para cada situação, com e sem recife, foram testados três níveis de maré:

- Baixa-mar 0,3 metros Z.H.
- Nível médio 2,0 metros Z.H.
- Preia-mar 3,7 metros Z.H.

Para cada nível de maré foram ensaiadas ondas regulares e irregulares com rumos de 220° e 235°. No caso das ondas regulares, e para cada rumo foram experimentados três períodos de onda, 11s, 15s e 19s e uma gama de alturas de onda de 1 a 7 metros ou até se verificar a rebentação na zona do batido. Cada ensaio teve a duração de 5 minutos.

Relativamente às ondas irregulares, e para cada rumo, foram ensaiados dois períodos de pico, 11s e 15s e alturas significativa de 3 metros para baixa-mar e nível médio e de 4 metros para preia-mar. Foi utilizado o espectro JONSWAP com um fator de elevação de pico $\gamma=3,3$. Cada ensaio teve a duração de 10 minutos.

As características acima enunciadas encontram-se resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1-Condições de agitação dos ensaios realizados

Tipo de onda	Direção	Nível de maré (m)	T (s)	H (m)
Regular	220° e 235°	+0,3 Z.H.	11	1 a 5
			15	1 a 5
			19	1 a 5
		+2 Z.H.	11	1 a 5
			15	1 a 5
			19	1 a 5
		+3,7 Z.H.	11	1 a 5 para 220° 1 a 6 para 235°
			15	1 a 5
			19	1 a 5 para 220° 1 a 6 para 235°

Tipo de onda	Direção	Nível de maré (m)	Tp (s)	Hs (m)
Irregular	220° e 235°	+0.3 Z.H.	11	3
			15	3
		+2 Z.H.	11	3
			15	3
		+3.7 Z.H.	11	4
			15	4

No decurso das experiências, foi medida a elevação da superfície livre através da utilização de 7 sondas dispostas numa quadrícula 1mx1m, acima descrita (Figura 3.6).

A sonda 1 foi colocada na vizinhança do gerador de onda e esteve sempre fixa, de forma a garantir o controlo de qualidade dos ensaios. As 6 sondas restantes foram mudando de posição. Para as condições de agitação especificadas, cada sonda ocupou 6 posições diferentes, de P1 a P6, permitindo assim simular 36 pontos de medição (Figura 3.6). Esta configuração foi alterada em situações de baixa-mar uma vez que a altura de água era insuficiente e tornava as medições de P4 a P6 inviáveis. Assim, as sondas apenas ocuparam os 3 primeiros lugares, P1 a P3,

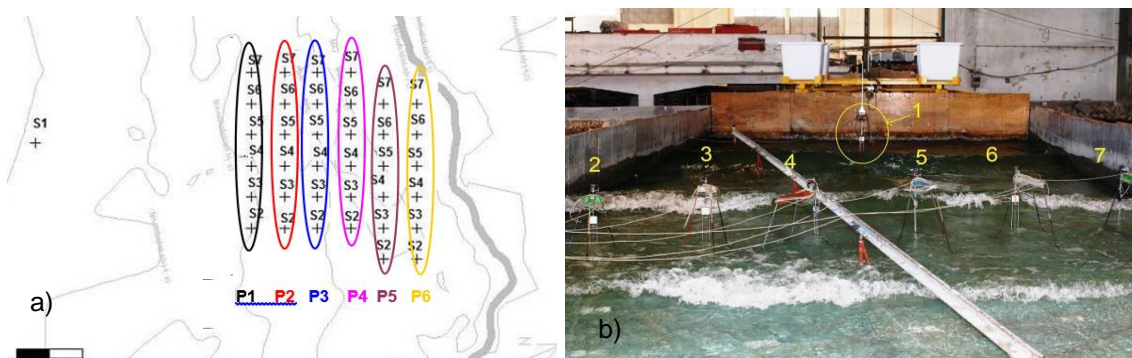


Figura 3.6- Localização das sondas. a) Posição das sondas; b) Posição das sondas num dos ensaios;

Com base nas observações da elevação da superfície livre foram calculados valores de altura de onda significativa, H_s e dos índices de agitação, H/H_0 , estimados pela relação entre a altura de onda medida em cada ponto e a altura da onda medida no ponto de saída do gerador de ondas. Um exemplo da apresentação de resultados para cada condição de agitação incidente pode ser observada na Figura 3.7.

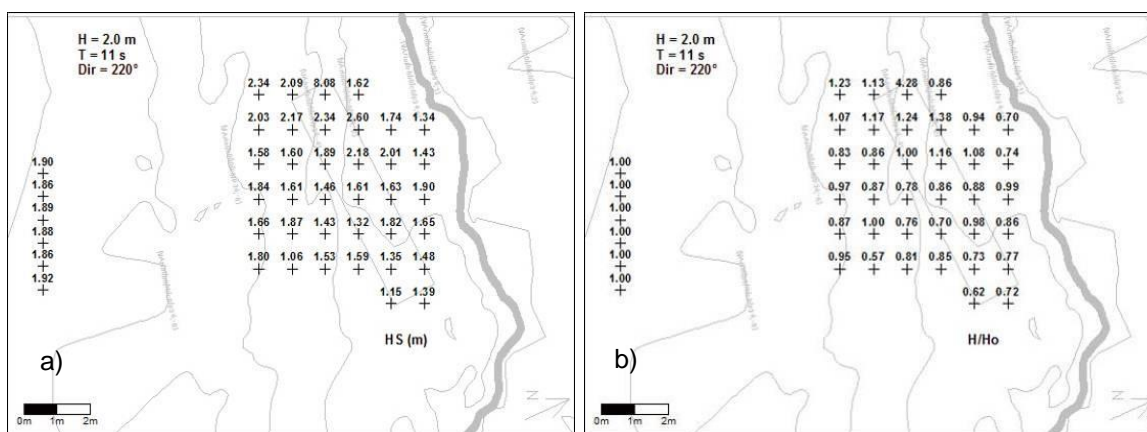


Figura 3.7- Exemplos de resultados; a) Altura de onda significativa nos pontos de medição; b) Índices de agitação nos pontos de medição

Através de filmagens e fotografias foi feita uma identificação visual da linha de rebentação e das condições de agitação que lhe estavam associadas. No total foram realizados 502 ensaios, dos quais 432 eram de ondas regulares e 72 de ondas irregulares.

3.2.3. Parâmetros característicos de rebentação

A construção do recife artificial visa aumentar a altura de onda na rebentação, garantindo que esta ocorra de uma forma mais gradual e num determinado local. Existem vários parâmetros para analisar o comportamento hidráulico do recife, nomeadamente:

- Altura da onda ao longo da linha de rebentação, H_b
- O ângulo na linha de rebentação, α
- O número de Iribarren, ξ_0

O ângulo na linha de rebentação, *peel angle*, é o ângulo formado entre a crista da onda e a linha de rebentação. Permite avaliar a velocidade que, em média, o surfista terá de ter para se manter na crista. Este parâmetro contribui para estabelecer o nível de dificuldade da onda e dimensionar o recife em conformidade. Pode ser definido em função da velocidade do surfista, através da seguinte relação (ver Figura 3.8):

$$V_s = \frac{c}{\sin \alpha} , \quad (5.1)$$

sendo c a velocidade de fase, α o ângulo na linha de rebentação e V_s a velocidade do surfista. Esta é a velocidade que o surfista tem de ter para estar sempre na fase de abertura da onda (amplitude e direção), correspondendo na Figura 3.8 aos pontos A e B. Quanto menor o ângulo de rebentação, maior terá de ser a velocidade do surfista para que este partindo do ponto A alcance o ponto B, estando sempre na posição de *peeling*. O que permite concluir que quanto menor o ângulo na linha de rebentação maior é a dificuldade da onda.

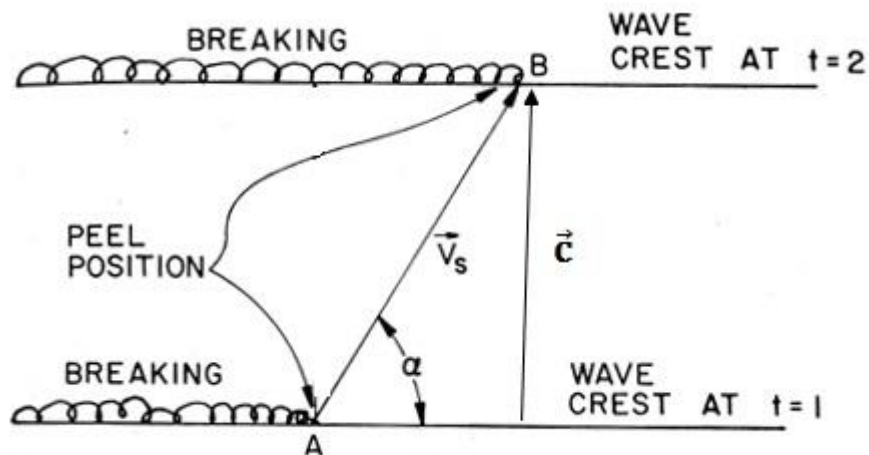


Figura 3.8- Esquema ilustrativo, retirada de Walker (1974)

A Tabela 3.2 permite relacionar o ângulo na linha de rebentação com a dificuldade da onda. Em geral, o valor mínimo aceitável para a prática de surf é de 30° (Pipa, 2008).

Tabela 3.2- Relação entre o ângulo na linha de rebentação e a dificuldade da onda, adaptado de Antunes (2009)

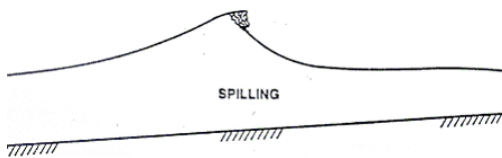
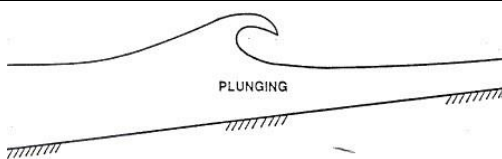
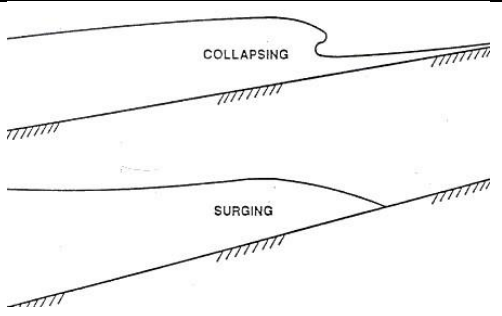
Nível	Descrição	α (°)
1	Iniciados	90
2	Iniciados capazes de surfar lateralmente ao longo da crista de rebentação	70
3	Surfistas que conseguem aumentar a velocidade na face da onda	60
4	Surfistas a aprender as manobras <i>standard</i> de surf numa única onda	55
5	Surfistas capazes de realizar as manobras <i>standard</i> de surf numa única onda	50
6	Surfistas que executam manobras <i>standard</i> de surf consecutivamente	40
7	Surfistas que executam manobras avançadas	29
8	Surfistas profissionais	27

Introduzido por Iribarren e Nogales (1949), o número de Iribarren, ξ_0 , permite caracterizar o tipo de rebentação da onda. Depende do declive do fundo, m , da altura de onda ao largo, H_0 e do comprimento de onda ao largo, L_0 .

$$\xi_0 = \frac{m}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (5.2)$$

Na Tabela 3.3 encontra-se a relação entre o tipo de rebentação e os valores do número de Iribarren segundo a metodologia de Battjes (1974)

Tabela 3.3-Metodologia de Battjes (1974) classificação do tipo de onda segundo o número de Iribarren

Tipo de rebentação	Número de Iribarren	Descrição
Progressiva (<i>spilling</i>)	$\xi_0 < 0,5$	 <p>SPILLING</p> <p>Onda deitada</p>
Mergulhante (<i>Plunging</i>)	$0,5 < \xi_0 < 3,3$	 <p>PLUNGING</p> <p>Onda tubular</p>
De Fundo (<i>Collapsing/Surging</i>)	$\xi_0 > 3,3$	 <p>COLLAPSING</p> <p>SURGING</p> <p>Onda insurfável</p>

O tipo de ondas desejado pelos surfistas são os chamados “tubos”, ondas com tipo de rebentação mergulhante e conseqüentemente com número de Iribarren entre o 0,5 e 3,3. Este tipo de rebentação ocorre sobre taludes intermédios a ásperos e em ondas de pequena a não muito elevada declividade. A onda tem uma forma arqueada até que enrola em voluta tornando-se côncava e cai violentamente sobre a cava da onda precedente, num jato penetrante.

4. Configuração do modelo

4.1. Condições de fronteira

O modelo foi utilizado com uma só camada o que é equivalente a um modelo integrado na vertical e, portanto, uma situação 2DH.

O domínio de estudo é de $690 \times 600 \text{ m}^2$. O SWASH define sempre os limites Norte, Sul, Este e Oeste do domínio. Esses limites não têm qualquer relação com os pontos cardeais, são apenas uma convenção adotada pelo programa, que será também utilizada no restante do documento para definir as fronteiras. Na Figura 4.1 encontra-se o domínio de estudo segundo a convenção do programa.

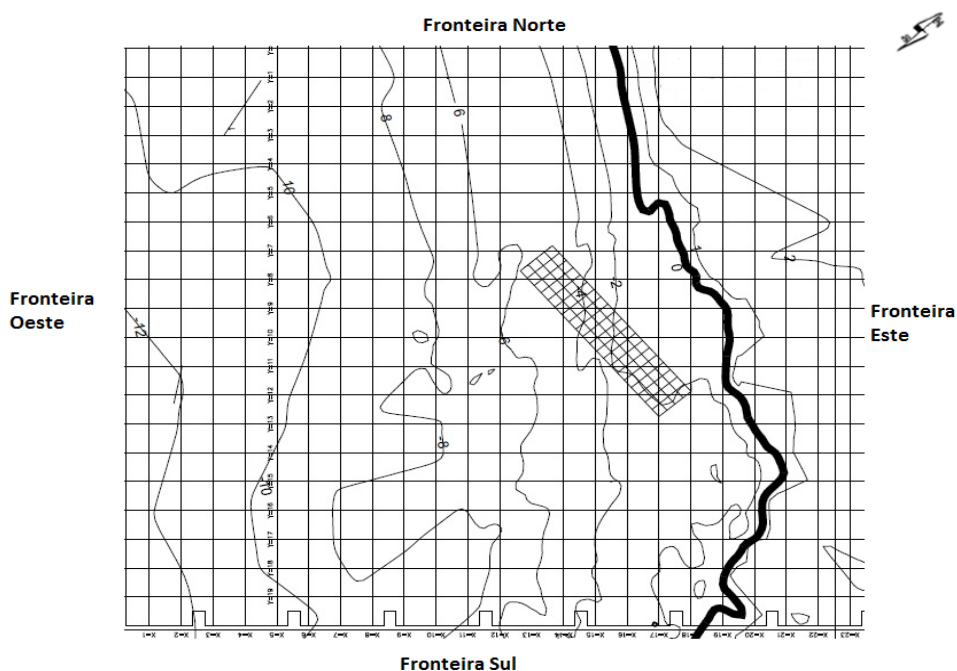


Figura 4.1- Domínio de estudo

No limite oeste do domínio, e para todos os cenários, foi colocada uma fronteira de baixa refletividade (*weakly reflective*). Nesta fronteira ocorre a geração de ondas, do tipo regular, e também a especificação da direção de onda, 220° ou 235° , consoante o cenário em questão.

Após os primeiros cenários, e através da análise dos valores na fronteira de geração de ondas, verificou-se que apesar de ser imposta uma altura de onda de 3 ou de 2 metros as ondas estavam a entrar no domínio com valores mais elevados. Existem vários motivos possíveis para esta amplificação da altura de onda na vizinhança da fronteira de geração. Em primeiro lugar seria desejável que a fronteira onde é imposta a geração de ondas tenha um declive regular na direção transversal à propagação de onda, o que neste estudo se verifica. Em segundo lugar esta fronteira pode estar localizada em profundidades intermédias o que implica desde logo uma interação com o fundo.

Para minimizar a referida amplificação, começou-se por colocar a fronteira mais ao largo. A batimetria de fundo foi adaptada para esta nova configuração. A extensão correspondeu a uma distância de 1200 m e 20 m profundidade com um declive constante. Estes valores foram adotados através de uma análise de sensibilidade para outras opções, em particular 900 m e mantendo 20 m de profundidade.

Foi experimentada também a introdução gradual da função forçadora (*ramp function*). Esta função permite que o programa inicie de forma gradual, com um tempo de aquecimento que pode ser escolhido pelo utilizador. Não existe nenhuma regra para a escolha deste tempo, foi por isso adotado 5% do tempo de simulação, correspondendo a cerca de 5 minutos. Esta função revelou-se pouco eficaz a solucionar este problema uma vez que teve pouco impacto nos resultados.

No limite este do domínio, correspondente à praia, é aconselhado (Zijlema et al. 2011) o uso de uma condição de radiação combinada com uma camada de absorção (*sponge layer*) de forma a permitir que as ondas saiam do domínio sem reflexões. No presente estudo foi utilizada a condição de radiação de Sommerfeld e uma *sponge layer* com uma espessura de 6 metros.

Nos restantes limites, dependendo do cenário, foram colocadas *sponge layers* testando a sua influência nos resultados.

As *sponge layers* são muito eficazes para absorver a energia da onda em fronteiras abertas, onde as ondas devem sair livremente do domínio prevenindo reflexões. SWASH team (2014) aconselha que estas tenham uma espessura de cerca 3 a 5 vezes o comprimento de onda típico das ondas em estudo. No entanto, o programa não conclui as simulações para esta gama de valores de espessuras.

Por forma a que o funcionamento do programa não fosse comprometido foi então necessário encontrar a espessura da *sponge layer*, para cada fronteira. Usou-se um processo iterativo, desde o valor aconselhado (cerca de 300 metros) até aos 6 metros (valor para o qual o programa funcionou e apresentou bons resultados). Para além da espessura de cada fronteira, foi também avaliada a própria necessidade de ter *sponge layer* em cada fronteira. Como solução final, foram colocadas *sponge layer* com uma espessura de 6 metros, na fronteira este, como dito anteriormente, e na fronteira norte.

4.2. Atrito e Viscosidade

O atrito do fundo torna-se um parâmetro ajustável uma vez que, devido ao efeito de escala, no laboratório desenvolvem-se fenómenos que não acontecem na realidade. No laboratório, onde o fundo é de betão liso, as profundidades são mais pequenas e como tal o atrito do fundo terá uma maior influência no resultado. Na praia, com fundos arenosos, as profundidades são maiores, como tal o atrito terá uma menor influência. Foram então testados

alguns valores para o coeficiente de *Manning*, n , entre 0,017 e o 0,025 $m^{-1/3}s$. Tendo sido adotado o valor 0,017 $m^{-1/3}s$.

Para modelar as tensões tangenciais horizontais turbulentas adotou-se a hipótese de Boussinesq e conseqüentemente é necessário introduzir uma viscosidade turbulenta horizontal. Os modelos considerados para o seu cálculo foram: o modelo de Smagorinsky com uma constante de 0,2 (valor aconselhado pelo programa), a hipótese do comprimento de mistura de Prandtl e a viscosidade horizontal constante. Os valores do comprimento de mistura de Prandtl e a constante de viscosidade foram selecionados após experimentados diferentes valores. Após a análise desses resultados, foi adotado o modelo de viscosidade horizontal constante com o valor 0,6 m^2/s .

5. Análise de resultados

5.1. Introdução

As simulações realizadas com o modelo SWASH foram comparadas com os resultados dos ensaios laboratoriais em termos de alturas significativas, índices de agitação e posição da linha de rebentação. A qualidade das simulações foi aferida através de indicadores estatísticos tais como o erro médio quadrático (RMSE), a média das diferenças (Viés) e o *scatter index* (SI) para os vários cenários:

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Modelo} - H_{Observado}) \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Modelo} - H_{Observado})^2} \quad (5.2)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{Observado}} \quad (5.3)$$

O ensaio laboratorial foi realizado à escala geométrica de 1:30 de acordo com a lei de semelhança de *Froude*. Os resultados experimentais foram obtidos através de uma análise no domínio do tempo. O modelo SWASH obtém as alturas significativas através de uma análise no domínio das frequências. Esta circunstância introduz uma discrepância inicial que condiciona a qualidade das comparações. De facto, a estimativa no domínio do tempo é inferior, em média, à estimativa no domínio da frequência. Holthuijsen (2007) apresentou a relação

$$H_{1/3} = 0,927 H_{m0} \quad (5.4)$$

As simulações numéricas foram divididas em duas situações, com e sem recife. Na Tabela 5.1 encontram-se as condições de agitação para cada cenário analisado.

Tabela 5.1- Cenários analisados

Nº do cenário	Situação	Direção de onda	Altura de onda (m)
1	Sem recife	220°	3
2			2
3		235°	3
4			2
5	Com recife	220°	3
6			2
7		235°	3
8			2

As simulações foram todas realizadas para ondas regulares com um nível médio de maré de 2 m Z.H e um período de 11 s.

Os resultados do SWASH foram comparados com os resultados laboratoriais obtidos através de sondas localizadas sobre o recife. Como referido anteriormente (Capítulo 3), os valores não foram medidos em simultâneo para as 36 posições das sondas, apenas existem 6 sondas que foram tomando as diferentes posições de P1 a P6, como descrito na Figura 5.1.

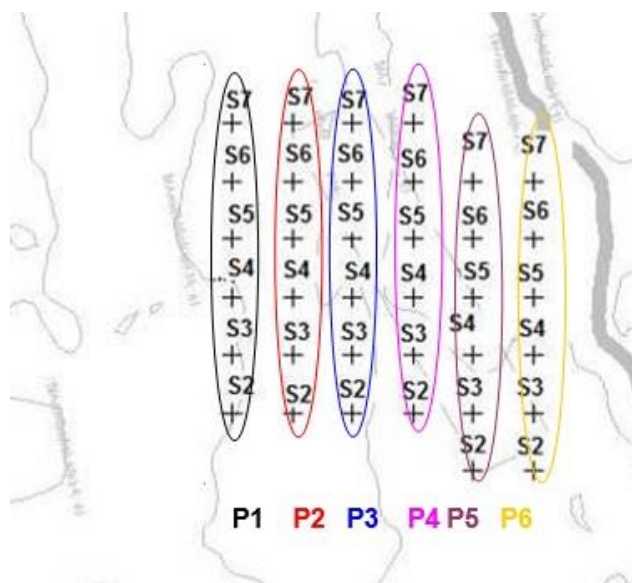


Figura 5.1 - Localização das Sondas, Ensaio Laboratorial

De forma a tornar mais simples a análise de resultados, estas sondas foram numeradas sequencialmente e a sua correspondência às dos ensaios laboratoriais encontra-se no anexo B. A Figura 5.2 contém as sondas numeradas sequencialmente sobre o recife.

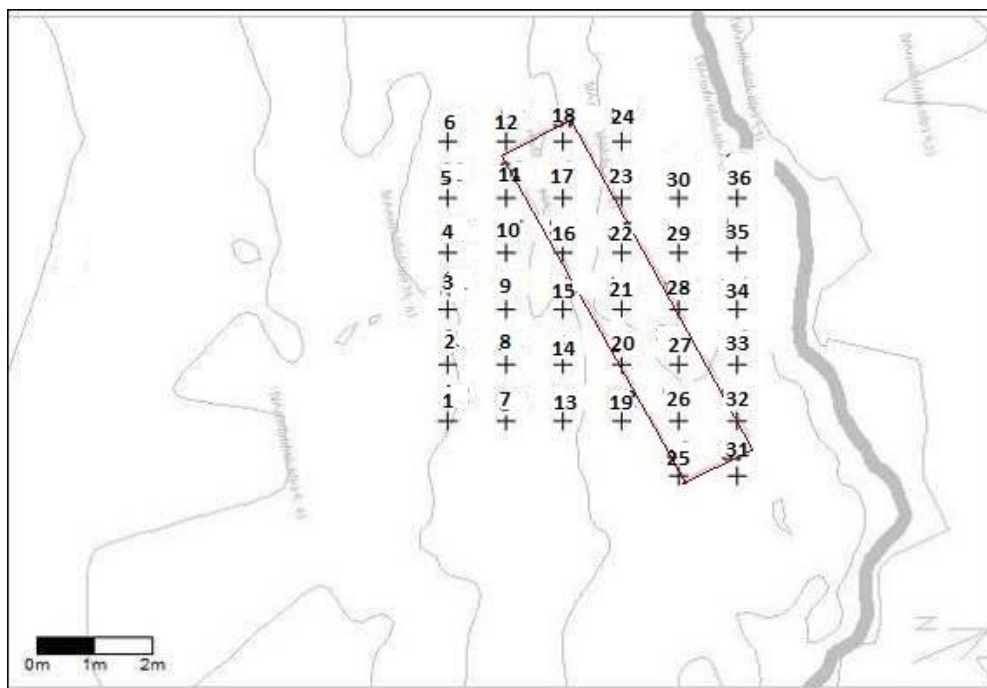


Figura 5.2- Localização das Sondas sobre o Recife

5.2. Simulações numéricas sem recife

Para cada cenário foram realizadas várias simulações. Os resultados numéricos para a situação sem recife foram os que apresentaram um melhor ajustamento.

Como indicado anteriormente, optou-se por uma geração ao largo colocada a 1200 m. O valor do coeficiente de Manning foi de $0,017 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ e foi adoptado o modelo de viscosidade horizontal contante com um valor de $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$.

O domínio e os parâmetros (atrito e viscosidade) foram os mesmos para todos os cenários, sendo que no anexo C encontra-se o ficheiro de entrada utilizado para o cenário 1, igual aos restantes apenas diferindo o valor de altura e direção de onda.

Os resultados são apresentados, para cada cenário, sob a forma de gráfico com os valores obtidos pelo SWASH e valores laboratoriais, seguindo-se uma tabela com o erro médio quadrático (RMSE), a média das diferenças (Viés) e o scatter Index (SI).

No anexo E encontram-se todos os valores para a situação sem recife com as respetivas diferenças absolutas (Laboratório/SWASH) para cada sonda. No anexo H, apresentam-se a comparação entre os índices de agitação de laboratório e os obtidos pelo SWASH.

Na Figura 5.3 apresentam-se os valores obtidos no programa SWASH comparados com os resultados Laboratoriais para o cenário 1, que corresponde a uma altura de onda de 3 m e direção 220° para a situação sem recife. A sonda 18, para este cenário, apresentou um

valor não aproveitável, como tal não foi considerada. O cenário 2, Figura 5.4, apenas difere na altura de onda que passa a ser de 2 m.

Os cenários 3 e 4, Figura 5.5 e 5.6, respectivamente, correspondem à direção de onda de 235° para a altura de onda 3 e 2 m. Para estes cenários, apenas foram analisadas 30 sondas, ao invés das 36, uma vez que só haviam resultados laboratoriais para as 30 sondas.

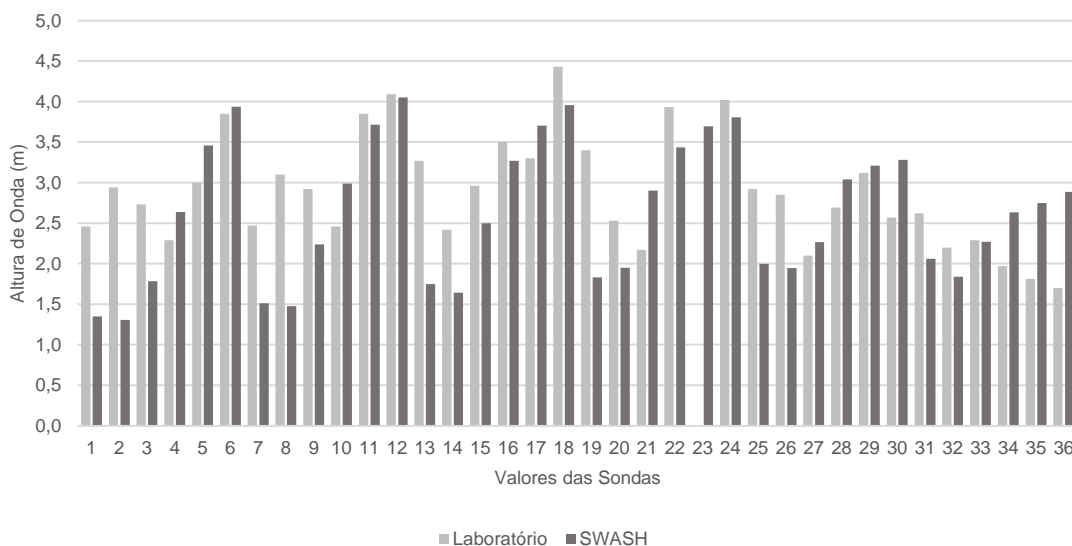


Figura 5.3 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 1: sem recife, direção de onda 220°, altura de onda 3 m

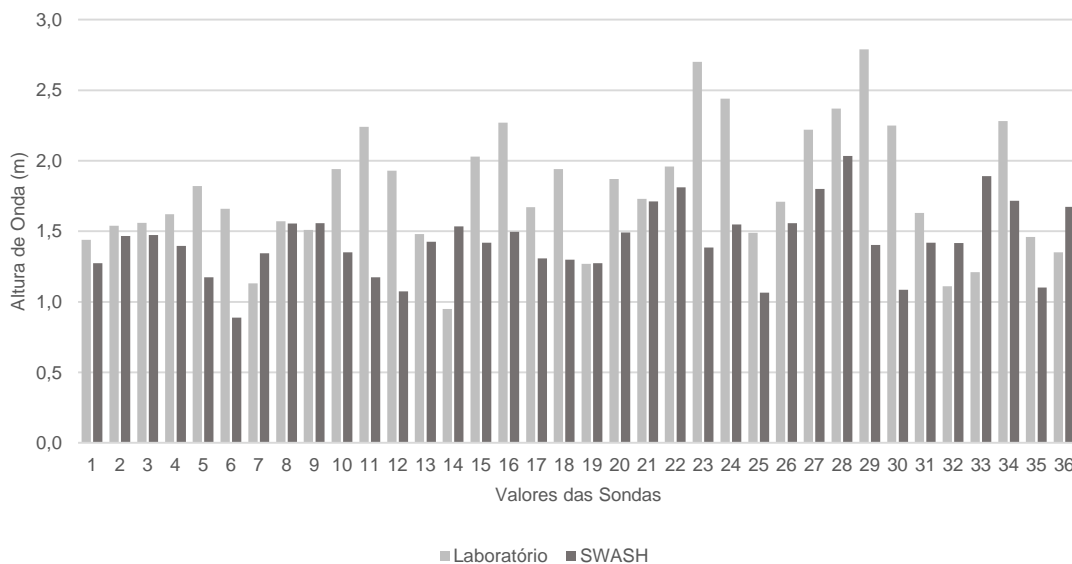


Figura 5.4- Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 2: sem recife, direção de onda 220°, altura de onda 2 m

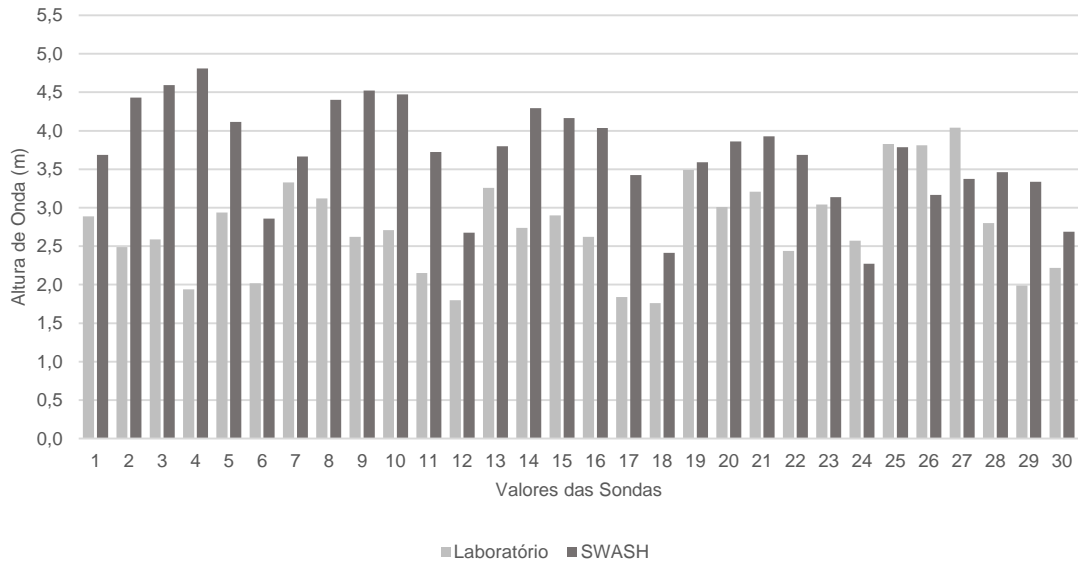


Figura 5.5 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 3: sem recife, direção de onda 235°, altura de onda 3 m

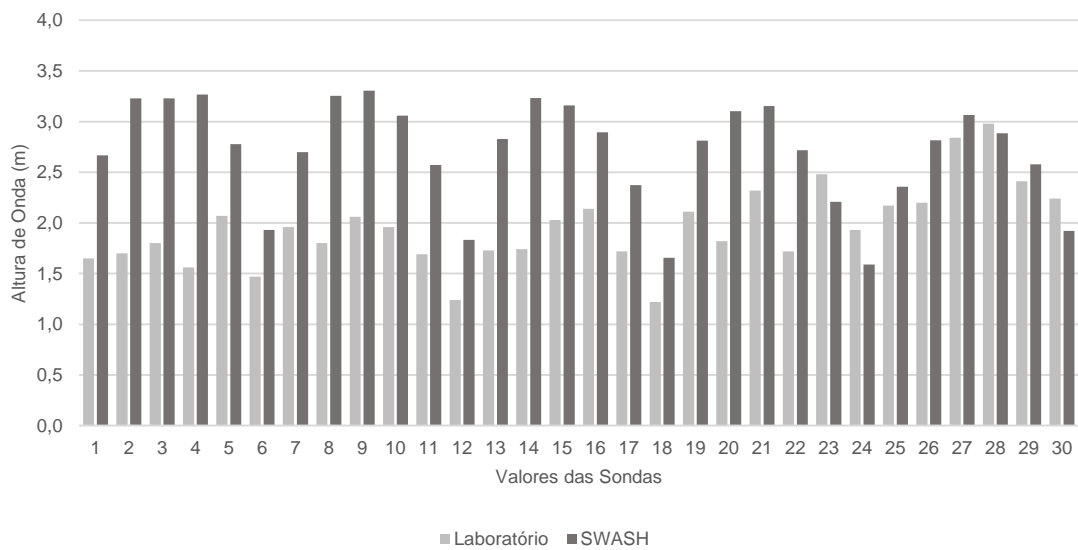


Figura 5.6 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 4: sem recife, direção de onda 235°, altura de onda 2 m

Na Tabela 5.2, encontram-se as estatísticas das comparações dos vários cenários para a situação sem recife.

Tabela 5.2 - Estatísticas das comparações para a situação sem recife

	RMSE (m)	Viés (m)	SI
Cenário 1	0,57	-0,22	0,20
Cenário 2	0,37	-0,35	0,22
Cenário 3	0,86	0,86	0,32
Cenário 4	0,75	0,75	0,38

Existe uma subestimação (Tabela 5.2) dos valores do SWASH face aos laboratoriais, nos cenários com direção de onda 220°, cenário 1 e 2, ao contrário dos cenários com direção de onda de 235°, cenário 3 e 4. Constata-se também que para a direção de onda de 235° existe uma degradação da qualidade das simulações espelhada nos valores estatísticos da Tabela 5.2.

A direção de propagação associada à direção de onda 235°, tem uma componente na direção da fronteira sul superior à direção 220°. Uma vez que não foi possível colocar uma camada de absorção nessa fronteira, poderá haver uma maior reflexão das ondas para o interior do domínio, empolando as ondas incidentes levando a maiores valores de altura de ondas para os cenários 3 e 4, Figura 5.5 e Figura 5.6.

Através da análise da Tabela 5.2 é visível uma gama de valores muito próxima para o *scatter index* do cenário 1 e 2 (0,20 e 0,22) e para o cenário 3 e 4 (0,32 e 0,38). Apesar de serem valores baixos, os resultados dos cenários 1 e 2 (direção de onda 220°) aproximam-se mais dos laboratoriais do que os cenários 3 e 4 (direção de onda 235°).

Analisando os resultados anteriores, nomeadamente a Tabela 5.2, é possível afirmar que os resultados obtidos pelo SWASH são próximos dos laboratoriais. O erro médio quadrático máximo deste conjunto de cenários é de 86 cm (cenário 4) e o mínimo de 37 cm (cenário 2).

5.3. Simulações numéricas com recife

A batimetria para os cenários com recife teve de sofrer algumas alterações face à utilizada em laboratório, uma vez que não houve acesso à batimetria utilizada nos ensaios com o recife.

Foi por isso necessário colocar o recife na batimetria original fazendo algumas alterações. O fundo foi ligeiramente alisado por forma a encaixar a batimetria do recife. Recorrendo ao programa SURFER™, criou-se uma batimetria com uma malha regular. Este programa está equipado com várias funções para este objetivo. A função escolhida suaviza os pontos angulosos, o que é indispensável para o restante domínio, mas induz algumas aproximações na configuração do recife. A principal foi a diminuição do declive da parte posterior do recife. A parte da frente do recife não sofreu muitas alterações além do alisamento do fundo. Com estas alterações à batimetria do modelo numérico, será de esperar que as diferenças entre os valores numéricos e laboratoriais sejam superiores face à situação sem recife.

O domínio e os vários parâmetros enunciados para a situação sem recife, foram os mesmos para a situação com recife, apenas diferindo a batimetria. Os ficheiros de entrada para o cenário 5 encontra-se no anexo D, os restantes cenários apresentam um modelo semelhante apenas variando as condições de agitação específicas de cada cenário.

Tal como no ponto anterior, os resultados são apresentados, para cada cenário, sob a forma de gráfico com os valores obtidos pelo SWASH e valores laboratoriais, seguindo-se uma tabela com o erro médio quadrático (RMSE), a média das diferenças (Viés) e o scatter Index (SI) para os vários cenários. No anexo F encontram-se todos os valores para a situação com recife com as respetivas diferenças absolutas (Laboratório/SWASH) para cada sonda. No anexo H, apresentam-se a comparação entre os índices de agitação de laboratório e os obtidos pelo SWASH.

O cenário 5, corresponde a uma altura de onda de 3 m e direção 220° para a situação com recife. Na Figura 5.7 encontram-se os valores obtidos no programa SWASH comparados com os resultados laboratoriais. O cenário 6, Figura 5.8, é em tudo igual ao 5, apenas diferindo a altura de onda, 2 m.

O cenário 7 (Figura 5.9) e 8 (Figura 5.10), correspondem à direção de onda de 235° diferindo apenas na altura de onda 3 e 2 m respetivamente.

A sonda 18, para o cenário 5 e 6, apresenta um valor laboratorial fora da gama de valores aceitável, como tal não foi considerado para este cenário.

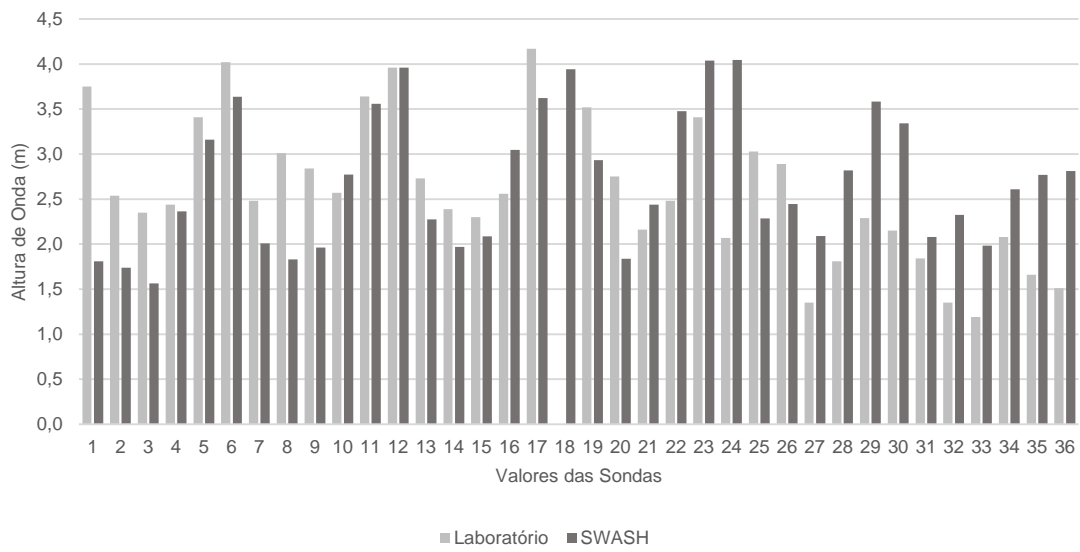


Figura 5.7 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 5: com recife, direção de onda 220°, altura de onda 3 m

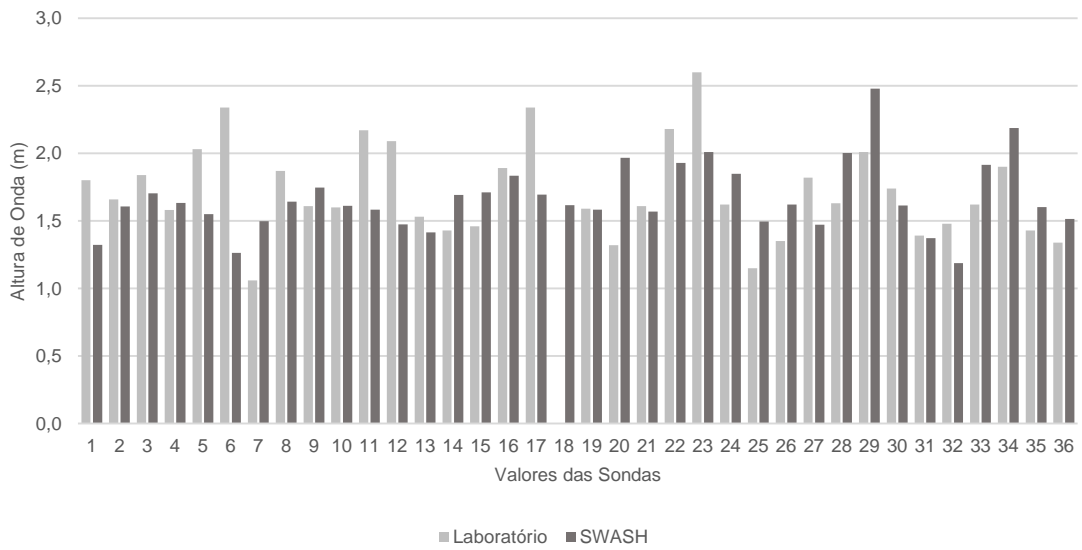


Figura 5.8- Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 6: com recife, direção de onda 220°, altura de onda 2 m

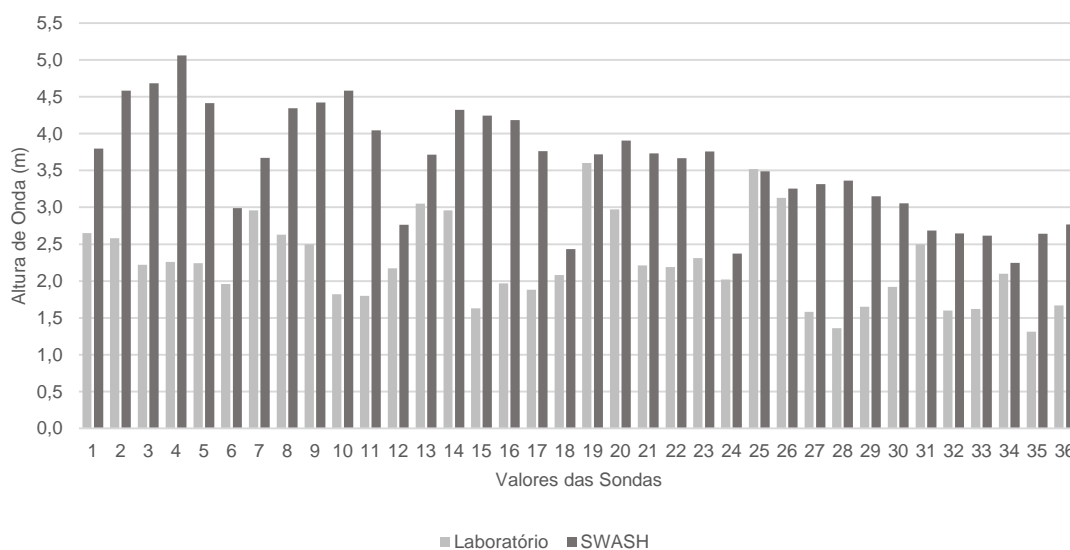


Figura 5.9 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 7: com recife, direção de onda 235°, altura de onda 3 m

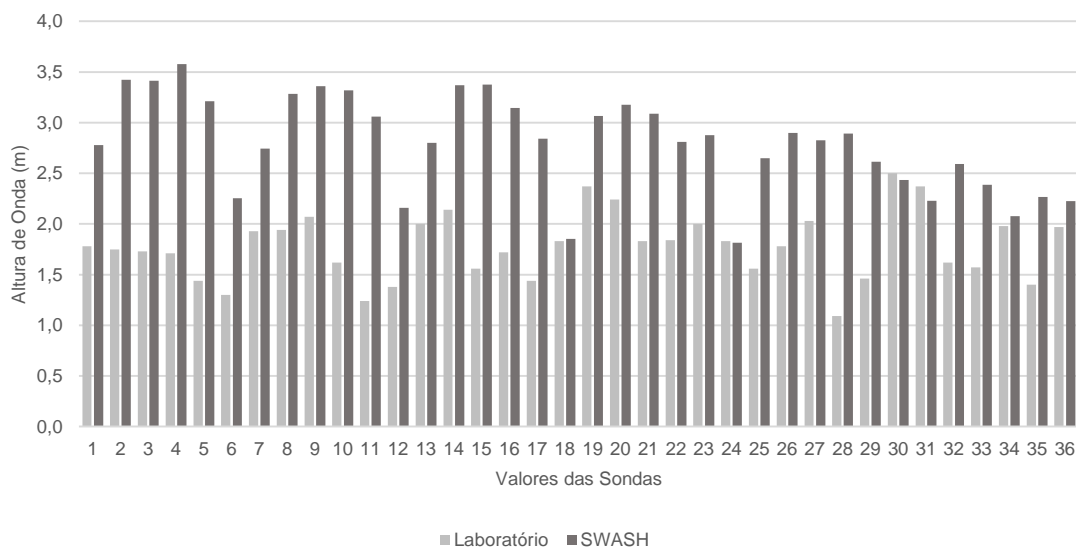


Figura 5.10 - Comparação entre os valores obtidos através do SWASH e os resultados Laboratoriais (Sondas) – Cenário 8: com recife, direção de onda 235°, altura de onda 2 m

Tabela 5.3 - Estatísticas de comparação para a situação com recife

	RMSE (m)	Viés (m)	SI
Cenário 5	0,63	-0,06	0,25
Cenário 6	0,27	-0,01	0,16
Cenário 7	1,35	1,35	0,62
Cenário 8	0,99	0,99	0,55

À semelhança da situação sem recife, mas não de uma forma tão explícita, existe uma subestimação dos valores obtidos pelo SWASH face aos laboratoriais para os cenários com direção de onda 220°, cenário 5 e 6 (Tabela 5.3). Existe uma maior degradação dos resultados (Tabela 5.3) para a direção de onda de 235° (cenário 7 e 8).

Comparando o cenário 1 e 5, cenários com as mesmas condições de agitação, mas para a situação sem e com recife, respetivamente, verifica-se que os valores do *scatter index* são bastante próximos (0.20 e 0,25), sendo possível concluir que a introdução do recife não conduziu a um comportamento de pior qualidade do programa. Analisando o cenário 6, com o menor *scatter index* de todos os cenários, 0,16, reforça a hipótese de que o comportamento do modelo SWASH não fica comprometido com uma alteração brusca do fundo.

Os cenários 7 e 8 (direção de onda de 235°) apresentam valores para o *scatter index* relativamente elevados (0.62 e 0.55) face aos cenários anteriores. Mas por comparação com os cenários 5 e 6, este aumento não se deverá, exclusivamente, à introdução, do recife. Os cenários 3 e 4, que apresentam as mesmas condições de agitação, mas para a situação sem recife também apresentavam valores mais elevados face ao cenário 1 e 2. Este pior desempenho, poderá dever-se à razão anteriormente apontada em relação à direção 235°. O que na situação com recife, face à existência de um obstáculo, poderá ter levado a uma amplificação dessas diferenças.

5.4. Linha de rebentação

Para determinar a posição da linha de rebentação foram analisadas as alturas de onda ao longo de 10 perfis (espaçados de 20 m) na direção de onda de cada cenário, 220° ou 235°. A Figura 5.11 apresenta as direções de onda assim como a zona em análise. A Figura 5.12, contém os 10 alinhamentos ao longo dos quais foram traçados os perfis para cada direção de onda da área em análise.

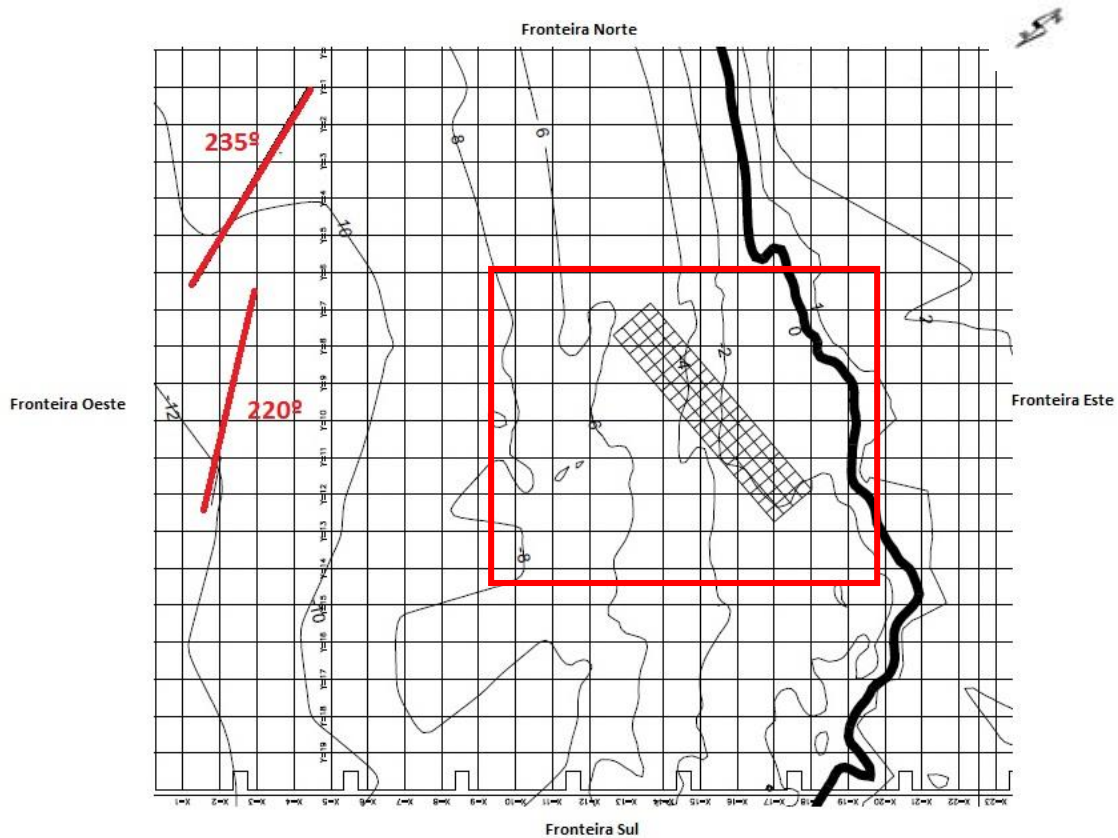


Figura 5.11 - Domínio com as direções de onda 220° e 235° e área em análise

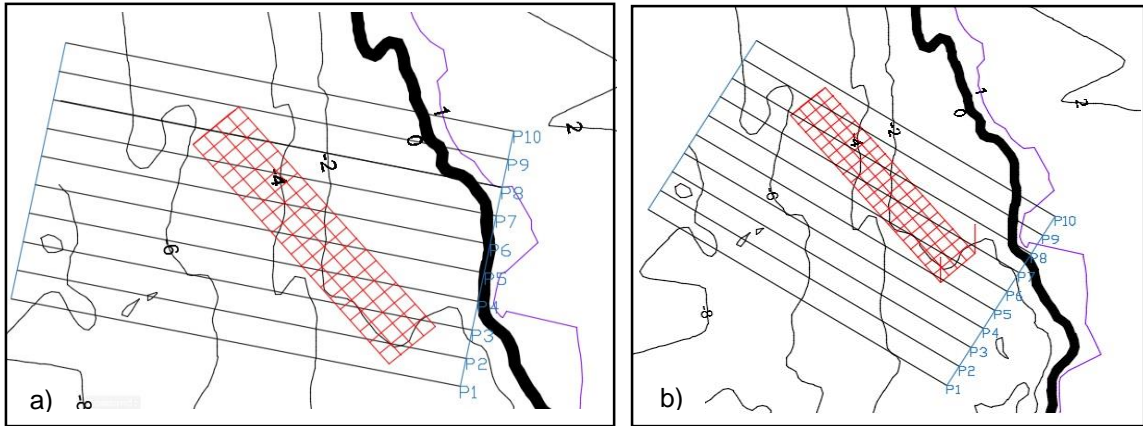
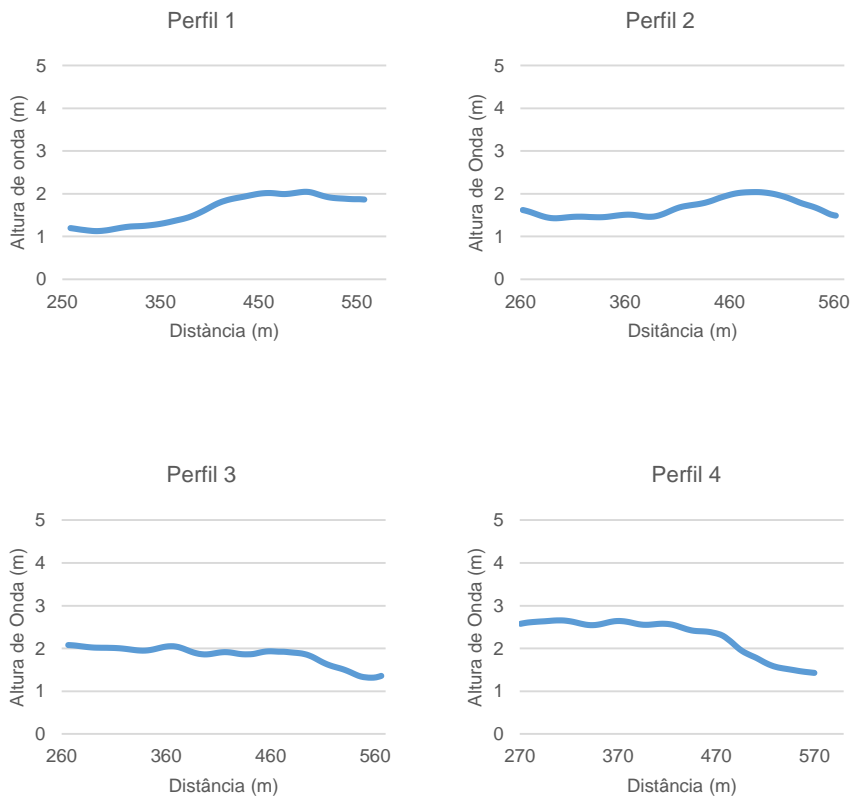


Figura 5.12 - Alinhamentos auxiliares para a obtenção dos perfis: a) Direção 220°, b) Direção 235°

Na Figura 5.13 encontram-se os perfis em análise para o cenário 1. Para este cenário, situação sem recife, apenas houve rebentação nos perfis finais (os alinhamentos mais próximos da fronteira norte), sendo esta do tipo progressiva com um número de Iribaren, ξ_0 , inferior a 0,5.



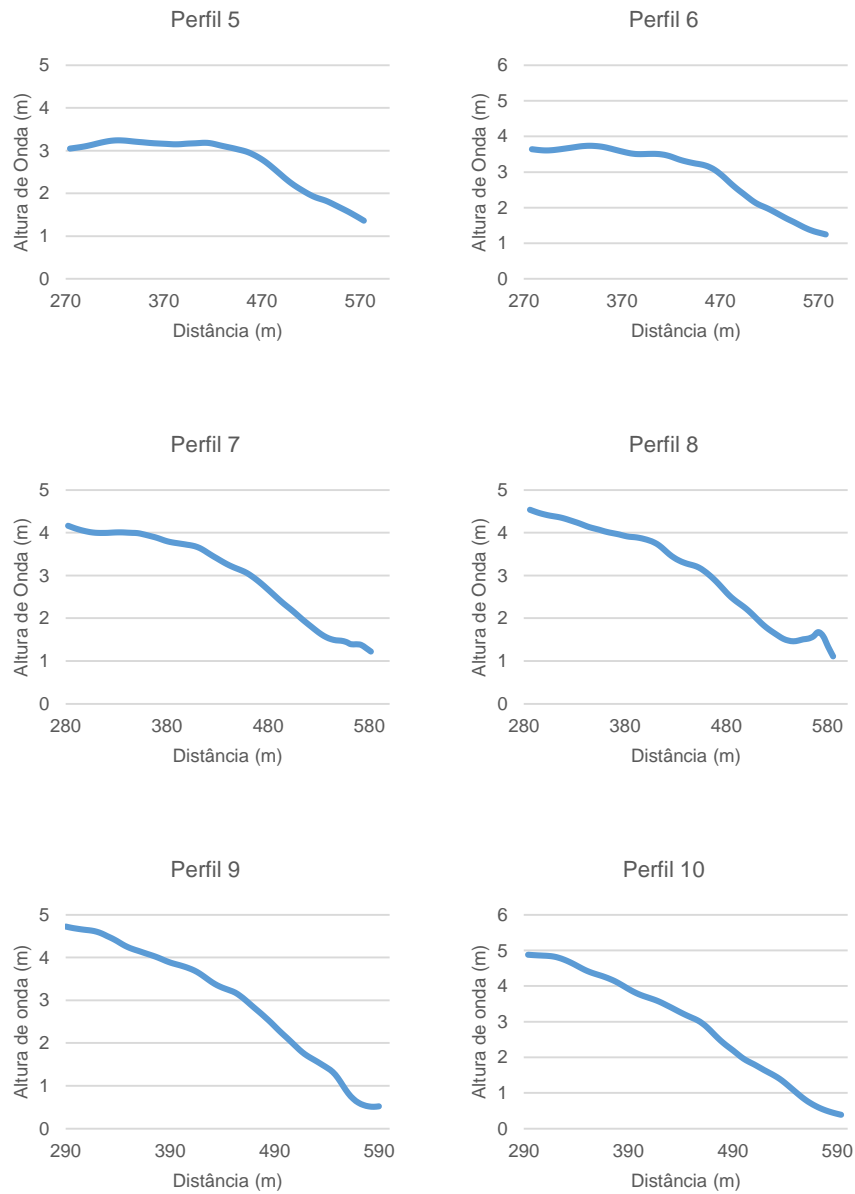


Figura 5.13 – Perfis para a determinação da linha de Rebentação - Cenário 1

Na Figura 5.14 apresenta-se a linha de rebentação para o cenário 1. Como dito anteriormente, trata-se de uma rebentação do tipo progressiva. Nos ensaios laboratoriais não foi determinada a posição da linha de rebentação para a situação acima descrita.

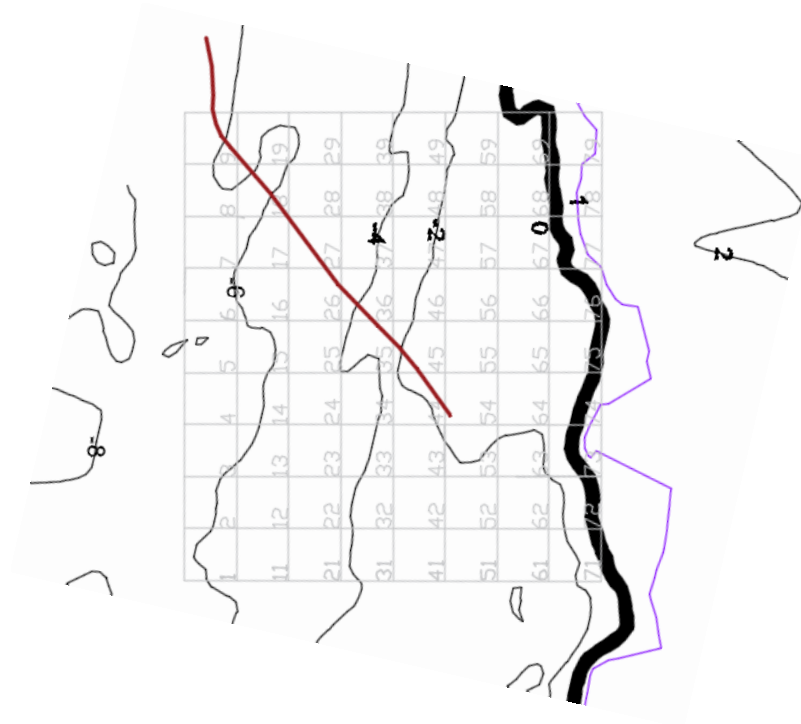
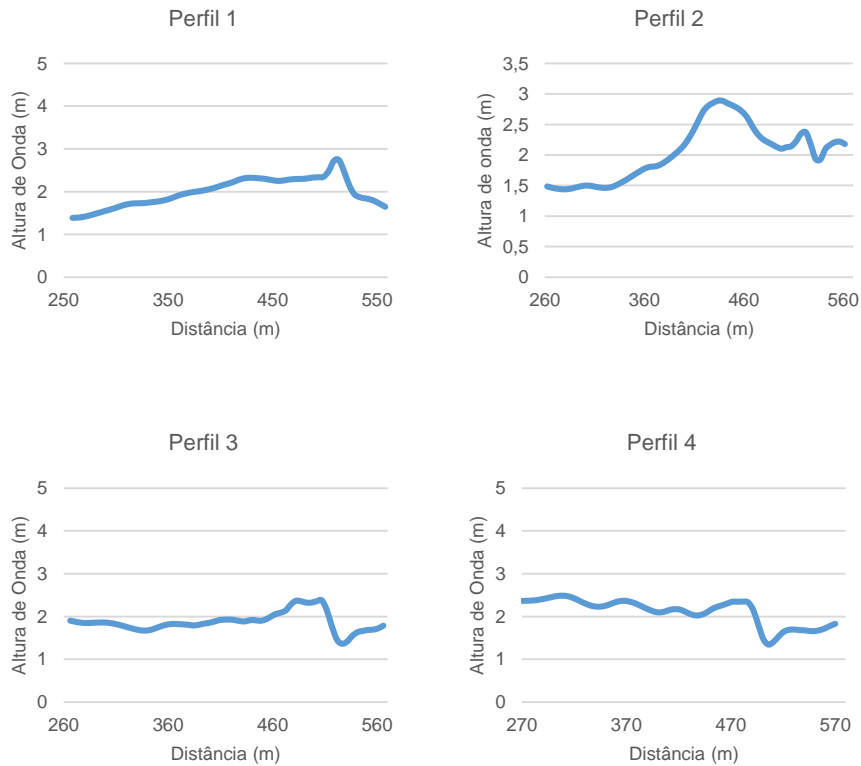


Figura 5.14 - Linha de Rebentação - Cenário 1

Os perfis de rebentação relativos ao cenário 5, Figura 5.16, são claramente diferentes dos anteriores (cenário 1), havendo rebentação desde o primeiro perfil e aproximando-se esta do tipo mergulhante, um numero de Iribaren ξ_0 , entre 0,3 e 0,7. O valor para o “peel angle” para este cenário foi de 68° (ver Tabela 3.2 – nível 2/3).



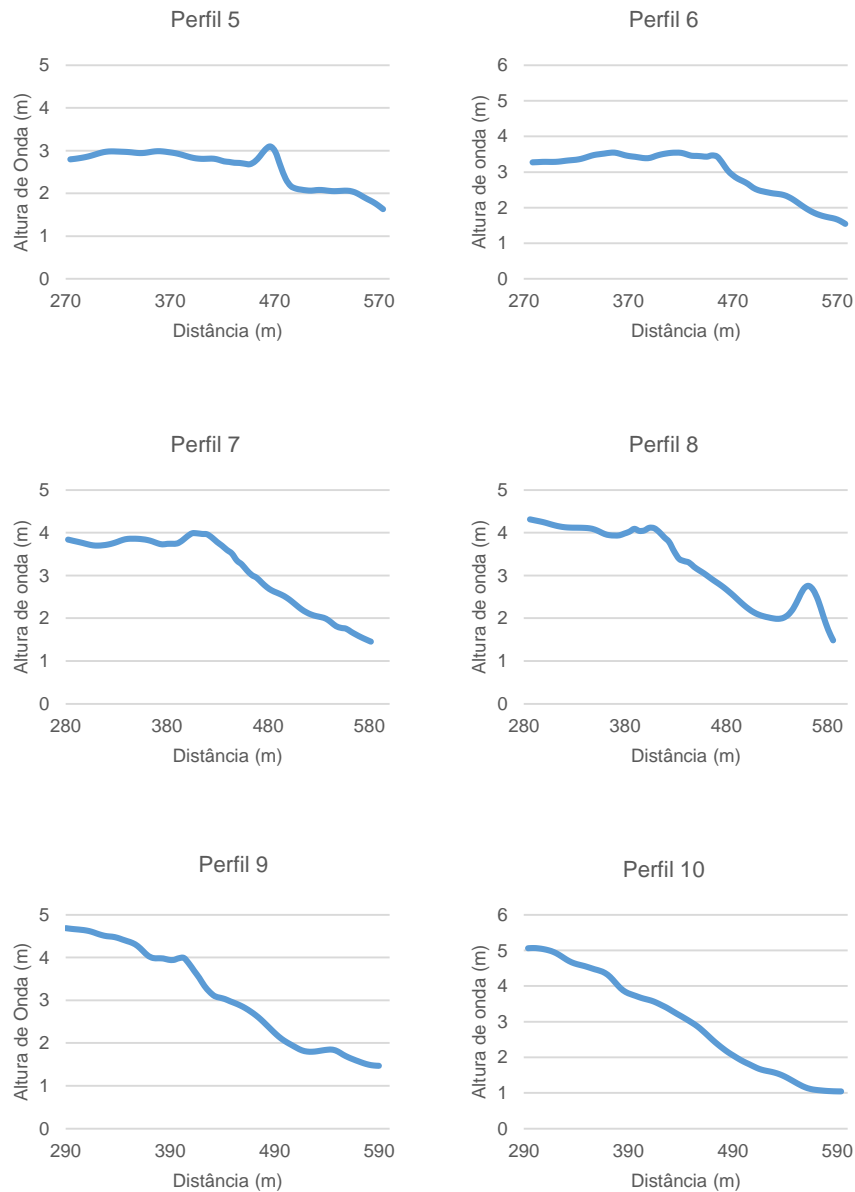


Figura 5.15 - Perfis para a determinação da linha de Rebentação - Cenário 5

Na Figura 5.16 apresentam-se as linhas de rebentação para o cenário 5, na Figura 5.16 a) a linha de rebentação obtida através dos valores do SWASH e na Figura 5.16 b) a linha obtida em laboratório, através de uma análise visual do ensaio. Apesar de apresentarem algumas diferenças, ambas estão localizadas sobre o recife com alinhamentos muito semelhantes.

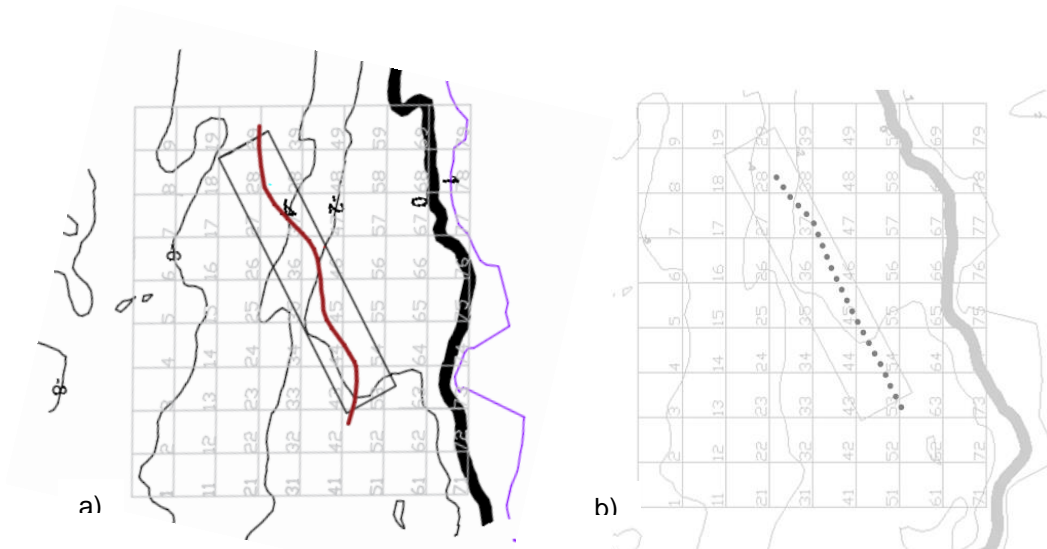


Figura 5.16 - Linha de Rebentação - Cenário 5: a) SWASH; b) Laboratório

Não foi possível determinar a linha de rebentação na situação da direção de onda 235° . A razão reside na impossibilidade de aplicar o critério anterior para a determinação dos pontos de rebentação e conseqüentemente a construção dessa mesma linha. Os perfis não foram conclusivos relativamente ao ponto de empolamento da onda e como tal não foi feita uma análise de rebentação para a direção de onda de 235° .

5.5. Análise de sensibilidade

Por forma a analisar a influência de alguns parâmetros nos resultados, nomeadamente o atrito de fundo e a viscosidade horizontal, foram realizadas simulações no SWASH com um dos parâmetros fixo e o outro variável. Foi ainda testada a situação de remoção desse mesmo parâmetro.

Para o atrito do fundo recorreu-se ao coeficiente de Manning, n , tendo sido escolhido, o valor $0,017m^{-1/3}s$. Na análise que se segue o modelo é exatamente igual ao usado anteriormente (cenário 1 e 5) apenas variando os valores do coeficiente de Manning.

Na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5 encontram-se os resultados (*scatter index* e erro médio quadrático) dessa análise.

Tabela 5.4 - Análise de Sensibilidade - Atrito Valores S.I

Viscosidade Horizontal $0,6 m^2/s$ – Valores <i>Scatter Index</i>								
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
n=0	0,19	Sem resultados	Sem resultados	Sem resultados	4,35	0,15	3,21	0,78
n=0,018	0,20	0,22	0,32	0,38	0,29	0,16	0,62	0,55
n= 0,017	0,20	0,22	0,32	0,38	0,25	0,16	0,62	0,55
n= 0,020	0,21	0,22	0,32	0,38	0,30	0,16	0,62	0,55

Tabela 5.5 - Análise de Sensibilidade - Atrito Valores RMSE

Viscosidade Horizontal $0,6 m^2/s$ – RMSE (m)								
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
n=0	0,53	Sem resultados	Sem resultados	Sem resultados	10,81	0,24	7,01	1,38
n=0,018	0,58	0,37	0,87	0,74	0,73	0,26	1,35	0,98
n= 0,017	0,57	0,37	0,86	0,75	0,63	0,26	1,35	0,99
n= 0,020	0,62	0,37	0,86	0,73	0,73	0,26	1,36	0,98

Através da análise dos resultados, a situação sem atrito leva à conclusão que este é um parâmetro fundamental para o bom funcionamento do programa. Alguns dos cenários

chegam a não ter resultados “cenário 2, cenário 3 e cenário 4” tendo a mensagem de erro – “water level is too far below the bottom level”

A viscosidade horizontal constante, foi o modelo de viscosidade horizontal adotado, tendo sido escolhido o valor de $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$. Para esta análise, o ficheiro de entrada é igual ao anterior, fixando o atrito no valor $0,017 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ e fazendo variar o valor da viscosidade horizontal ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$) e o modelo de viscosidade baseado no comprimento de mistura de Prandtl, com um valor de $0,02 \text{ m}$. Tendo sido mais uma vez testado o comportamento do programa à não introdução deste parâmetro.

Na Tabela 5.6 e Tabela 5.7, encontram-se os resultados estáticos desta análise.

Tabela 5.6 - Análise de Sensibilidade - Viscosidade Valores S.I.

Atrito 0,017 – Valores <i>Scatter Index</i>								
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Sem Viscosidade	0,19	0,16	0,60	0,69	0,37	0,35	0,84	0,68
Viscosidade Constante 0,6 m^2/s	0,20	0,22	0,32	0,38	0,25	0,16	0,62	0,55
Viscosidade Constante 0,5 m^2/s	0,19	0,20	0,41	0,42	0,23	0,17	0,64	0,59
Prandtl 0,02 m	0,21	0,14	0,60	0,67	0,30	0,27	0,79	0,69

Tabela 5.7 - Análise de Sensibilidade - Viscosidade Valores RMSE

Atrito 0,017 – RMSE (m)								
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Sem Viscosidade	0,52	0,29	1,65	1,35	0,92	0,56	1,84	1,21
Viscosidade Constante 0,6 m^2/s	0,57	0,37	0,86	0,75	0,63	0,26	1,35	0,99
Viscosidade Constante 0,5 m^2/s	0,53	0,34	1,10	0,83	0,58	0,27	1,39	1,06
Prandtl 0,02 m	0,60	0,24	1,64	1,31	0,73	0,44	1,71	1,23

O modelo de viscosidade horizontal constante, com o coeficiente $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$ foi o que obteve, no computo geral, melhores resultados tendo sido por isso o escolhido. É visível que a influência do parâmetro viscosidade horizontal não é tao preponderante como o atrito de fundo, uma vez que a sua não introdução não impede o funcionamento do programa, apenas aumenta

a diferença entre os resultados do SWASH e os laboratoriais, sendo que estas diferenças não são tão elevadas como para a situação sem átrio de fundo.

No anexo G é possível encontrar um dos exemplos utilizados para definição do modelo final, com a introdução gradual dos vários parâmetros.

6. Conclusões

O objetivo desta dissertação era avaliar o desempenho do programa SWASH em fundos de variação rápida, utilizando como caso de estudo um recife artificial. Uma vez que o SWASH é um programa concebido para modelar fenómenos característicos da zona costeira, e como uma situação de sobrelevação do fundo pode ocorrer facilmente na zona costeira, trata-se de um bom teste para o modelo SWASH.

O modelo SWASH pode ser aplicado a situações muito diversas e complexas, próprias de zonas litorais e abarca fenómenos de escalas parciais muito alargadas, desde circulações oceânicas até à zona de rebentação. É um programa extenso, com muitas opções de configuração e parâmetros de livre escolha. A sua utilização requer conhecimento aprofundado da matéria em causa e dos mecanismos associados neste estudo. Foram utilizados dados laboratoriais como situação de referência para avaliar o comportamento das simulações numéricas. Tratou-se de uma validação quantitativa através das estatísticas de comparação. Incluiu-se também uma análise de sensibilidade, necessariamente breve, dada a complexidade e o número de variáveis acima referido.

De um modo geral, a direção 220° apresentou sempre um ajustamento superior em relação à de 235°, quer ao nível da modelação da altura significativa, quer ao nível da linha de rebentação. Possivelmente, as simulações associadas a esta última direção requereriam outro tipo de configuração para as condições de fronteira, em especial a fronteira sul, limitando a sua capacidade refletora.

O cenário 7 apresentou um S.I de 0,11 quando introduzidas *sponge layers* nas fronteiras norte, sul e este do domínio, o que indica que esta talvez fosse a melhor solução para este estudo. Apenas não foi adotada pois nos restantes cenários existiram simulações que não apresentaram resultados, quando com este tipo de condições de fronteira, acusando o erro – “Water level is too far below the bottom level”, fazendo com que o programa pare e não apresente resultados. A introdução do atrito de fundo e a colocação da fronteira de geração mais ao largo (1200 m) revelaram-se opções essenciais para o bom funcionamento do programa. Quando não introduzidos, podem provocar o erro acima descrito.

A linha de rebentação do cenário 5, determinada através da análise das alturas de onda, apresenta enormes semelhanças face à obtida no laboratório localizando-se também sobre o recife, ao contrario da linha de rebentação do cenário 1. Também o tipo de rebentação, para este cenário, passou a ser do tipo mergulhante ideal para a pratica de surf. Esta configuração das linhas de rebentação está em linha com as considerações expressas no referido relatório do LNEC:

As condições para a prática de surf melhoram com a construção do recife para uma gama de alturas e períodos frequente na zona; para essas condições, a orientação da

linha de rebentação na situação com recife muda claramente, especialmente para as situações em que a rebentação apresenta boas condições para o surf(..)

(Fortes et al. 2007)

Apesar da dificuldade de simular um domínio bidimensional, sem recurso a computação paralela, a aplicação do SWASH descrita neste trabalho conduziu a resultados muito satisfatórios. A modelação do recife, variação brusca do fundo, objetivo que estava presente neste trabalho, foi executada com apenas uma camada na vertical. Com certeza que o modelo em opção de multicamadas, que permite uma melhor representação da componente vertical da velocidade, seria a mais apropriada perante a situação acima descrita. Uma vez mais, tal só será possível com recursos computacionais que incluam paralelização do código numérico. Como justificação para esta observação, indica-se como exemplo uma das relações encontradas entre o tempo numérico e o tempo real de simulação, 24 horas para 55 minutos.

Para além destes desenvolvimentos possíveis de carácter geral, este estudo em particular carece de uma análise fina da influência da presença de *sponge layer* para a fronteira sul. Nomeadamente, investigar se de facto é a ausência de *sponge layer* na fronteira sul que conduziu a piores resultados para a direção de onda 235°.

Referências bibliográficas

- Antunes, D.F., 2009. *Modelação Física de um recife artificial para o surf em São Pedro do Estoril.* Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico
- Bancroft, S., 1999. Performance monitoring of the Cable Station artificial surfing reef. BSc Dissertation, University of Western Australia.
- Battjes, J.A., 1974. *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to windgenerated waves.* Technical University of Delft
- Fortes, C., Neves, M.D.G. & Pinheiro, L., 2008. *Viabilidade da implementação de um recife artificial para a prática de surf na praia de São Pedro do Estoril e criação de uma estrutura de protecção e amarração do submarino Barracuda.* Relatório LNEC-NPE
- Holthuijsen, L. H., 2007, *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge University Press, UK
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves: their generation and propagation on the ocean surface*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey
- Loomis, M., 2003. *A review of artificial surfing reefs and their effectiveness as recreation areas, marine habitats, and erosion control devices.* Coastal Policy Class, Nova Southeastern University Oceanographic Center
- Pattiaratchi, C., 2003. *Performance of an artificial surfing reef: Cable Station, Western Australia* COPEDEC VI, 2003, Colombo, Sri Lanka
- Pipa, I. de J.L., 2008. *Melhoria das condições de abrigo na marina da Póvoa de Varzim. Estudos em modelo matemático.* Dissertação de Mestrado IST. Departamento de Engenharia Civil
- The SWASH team, 2014, *SWASH user manual*, Delft University Technology. The Netherlands
- Trigo-Teixeira, A., 1994, *Finite element modeling of hydrodynamics in costal zones.* PhD Thesis. Dept Civil Engineering, University College of Swanse
- Van Mierlo, F.A.J.M., 2014. *Numerical modelling of wave penetration in ports.* MsC Thesis Delft University of Technology
- Walker, J.R., 1974. *Recreational surf parameters*, University of Hawai, Dept. Of Ocean Engenering, Technical report no.30
- Zijlema, M., Stelling, G. & Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering* 58 (10), 992-1012

ANEXOS

Anexo A

Teoria linear da onda

A teoria linear da onda, descreve as ondas do mar como uma soma de várias ondas harmónicas. Para esta teoria ser aplicável, são necessárias algumas simplificações como: considerar o fluido incompressível, irrotacional e invíscido, considerar também uma profundidade uniforme. Estas simplificações serão tao mais exatas quanto mais as condições reais se aproximem das idealizadas.

Considerando que a onda se propaga na direção x , z a sua posição vertical, zero como o nível médio do mar tendo os valores positivos acima e os valores negativos abaixo e o fundo impermeável localizado a $z=-h$. Como o fluido é irrotacional, uma boa aproximação fora da zona de rebentação de ondas ou de zonas com profundidade pequena, o gradiente de velocidade $\phi(x, z, t)$ definido em (1) obedece à Equação de Laplace explicita em (2).

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \text{ e } z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad 1$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 z^2} = 0 \quad 2$$

A equação de Laplace é complementada com condições de fronteira, no fundo e na superfície livre, permitindo a particularização do problema em causa. Estas condições representam o caracter não linear do problema, devido não só aos termos quadráticos, mas também pela presença de uma fronteira especial, a superfície de separação de dois fluidos. Tal linearização é possível se a declividade, δ , cumprir a condição, $\delta \ll 1$ e para ondas de baixa amplitude quando comparadas com o fundo.

Se for o fundo impermeável, horizontal a velocidade normal terá de ser nula.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0; z = -h \quad 3$$

A condição fronteira na superfície livre é constituída por duas componentes, a condição dinâmica e a condição cinemática. A condição dinâmica representa o balanço de forças na interface. Desprezando a tensão superficial, a pressão deve ser igual dos dois lados da interface ar-mar. Admitindo pressões relativas, a pressão atmosférica à igual a zero, $p_a = 0$.

Sendo η a elevação, a condição de fronteira dinâmica da superfície livre, já linearizada, é dada por

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{z=0} + g\eta = 0 \quad 4$$

A condição cinemática da superfície livre traduz a continuidade da superfície livre, e constitui uma superfície material, através da qual não há fluxo de fluido. A velocidade do fluido perpendicular a essa interface deve ser igual à velocidade normal da superfície. Esta condição pode ser escrita na forma (linearizada)

$$\left(\frac{\partial\eta}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_{z=0} \quad 5$$

A junção duas condições de fronteira da superfície livre, (4) e (5) permite obter

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0; z = 0 \quad 6$$

A Figura 0.1 sintetiza a representação esquemática do domínio de aplicação da equação de Laplace e das condições de fronteira.

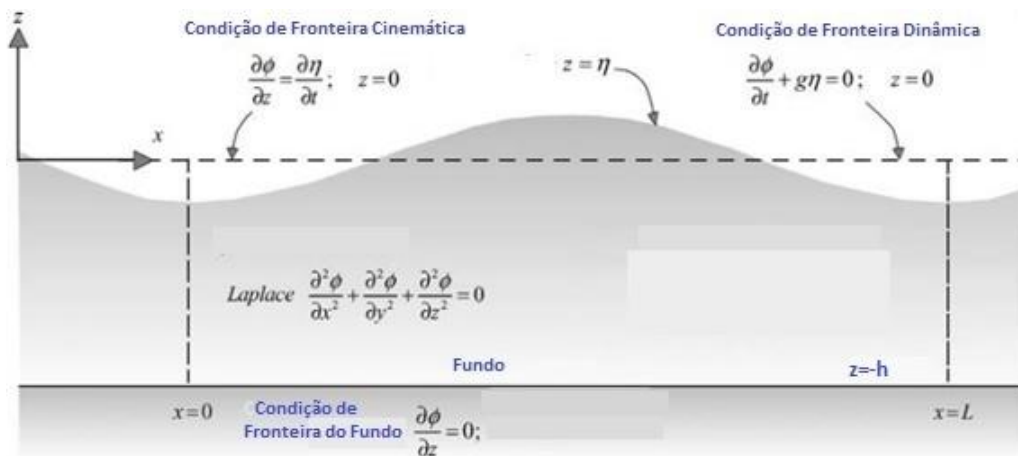


Figura 0.1-Condições de Fronteira da teoria linear (adaptado de Holthuisen (2007))

A solução da equação de Laplace com as condições de fronteira, (4) e (5), é obtida por uma técnica de separação de variáveis e o potencial tem a forma seguinte

$$\phi(x, z, t) = -\frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cosh(kx - \omega t) \quad 7$$

Desta solução resulta a relação de dispersão, da qual resultam as trajetórias das diferentes ondas geradas consoante o seu comprimento de onda e período:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad 8$$

Sendo $k = \frac{2\pi}{L}$ o número de onda, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ a frequência angular e L o comprimento de onda, esta expressão pode ainda assumir a forma:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad 9$$

Esta equação pode ser simplificada consoante a profundidade, sendo assim mais expedita a sua resolução. Para águas profundas, em que a profundidade é muito maior que o comprimento de onda a equação (9) toma a forma:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad 10$$

Para águas pouco profundas, em que a onda se aproxima da costa e a profundidade vai ficando cada vez mais pequena em comparação com o comprimento de onda, a equação (9) pode ser dada por:

$$L^2 = ghT^2 \quad 11$$

Anexo B

Sondas		
P1	S2	1
	S3	2
	S4	3
	S5	4
	S6	5
	S7	6
P2	S2	7
	S3	8
	S4	9
	S5	10
	S6	11
	S7	12
P3	S2	13
	S3	14
	S4	15
	S5	16
	S6	17
	S7	18
P4	S2	19
	S3	20
	S4	21
	S5	22
	S6	23
	S7	24
P5	S2	25
	S3	26
	S4	27
	S5	28
	S6	29
	S7	30
P6	S2	31
	S3	32
	S4	33
	S5	34
	S6	35
	S7	36

Anexo C

Ficheiro de entrada - cenário 1

```
PROJECT 'ensaio' '1'
$
SET level=2 depmin=0.001
$
MODE NONST TWOD
$
CGRID REGULAR 0 0 0 1896 606 632 202
$
INP BOT 0 0 0 316 101 6 6
READ BOT 1. 'BATsemrecife.bot' 4 0 FREE
$
INIT ZERO
$
BOU SIDE W CCW BTYPE WEAK UNIF REG 3 11 349
BOU SIDE E CCW BTYPE RADIATION
SPON E 6
SPON N 6
$
FRIC MANNING 0.017
VISC 0.6
$BRE 0.6 0.3
$
NONHYD BOX PREC ILU
$
DISCRET UPW UMOM H BDF
DISCRET UPW WMOM H BDF
DISCRET UPW UMOM V BDF
DISCRET UPW WMOM V BDF
DISCRET CORRDEP MINMOD
$
TIMEI METH EXPL 0.1 0.3
$***** OUTPUT REQUESTS *****
QUANTI HSIG SETUP dur 30 MIN
$
POINTS 'SONDAS' FILE 'SONDAS.loc'
TABLE 'SONDAS' HEADER 'resultadosSONDAS.tbl' BOTLEV WATL SETUP HSIG
TSEC XP YP
$
TEST 1,0
COMPUTE 000000.000 0.01 SEC 005500.000
STOP
```

Anexo D

Ficheiro de entrada - cenário 5

```
PROJECT 'ensaio' '5'  
$  
SET level=2 depmin=0.001  
$  
MODE NONST TWOD  
$  
$COORD CART  
$  
CGRID REGULAR 0 0 0 1896 606 632 202  
$  
$VERTICAL 3  
$  
INP BOT 0 0 0 266 100 6 6  
READ BOT 1. 'BATcomrecife.bot' 4 0 FREE  
$  
INIT ZERO  
$  
BOU SIDE W CCW BTYPE WEAK UNIF REG 3 11 349  
BOU SIDE E CCW BTYPE RADIATION  
SPON E 6  
SPON N 6  
$  
FRIC MANNING 0.018  
VISC 0.6  
$BRE 0.6 0.3  
$  
NONHYD BOX PREC ILU  
$  
DISCRET UPW UMOM H BDF  
DISCRET UPW WMOM H BDF  
DISCRET UPW UMOM V BDF  
DISCRET UPW WMOM V BDF  
DISCRET CORRDEP MINMOD  
$  
TIMEI METH EXPL 0.1 0.3  
$***** OUTPUT REQUESTS *****  
QUANTI HSIQ SETUP dur 30 MIN  
$  
POINTS 'SONDAS' FILE 'SONDAS.loc'  
TABLE 'SONDAS' HEADER 'resultadosSONDAS.tbl' BOTLEV WATL SETUP HSIQ  
TSEC XP YP  
$  
TEST 1,0  
COMPUTE 000000.000 0.01 SEC 005500.000  
STOP
```

Anexo E

Resultados situação sem recife

Sondas			Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3				Cenário 4			
			HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)
P1	2	1	2,46	1,35	-1,11	1,11	1,44	1,27	-0,17	0,17	2,89	3,69	0,80	0,80	1,65	2,67	1,02	1,02
	3	2	2,94	1,30	-1,64	1,64	1,54	1,47	-0,07	0,07	2,49	4,43	1,94	1,94	1,70	3,23	1,53	1,53
	4	3	2,73	1,78	-0,95	0,95	1,56	1,47	-0,09	0,09	2,59	4,59	2,00	2,00	1,80	3,23	1,43	1,43
	5	4	2,29	2,64	0,35	0,35	1,62	1,40	-0,22	0,22	1,94	4,81	2,87	2,87	1,56	3,27	1,71	1,71
	6	5	3,00	3,46	0,46	0,46	1,82	1,17	-0,65	0,65	2,94	4,11	1,17	1,17	2,07	2,78	0,71	0,71
	7	6	3,85	3,94	0,09	0,09	1,66	0,89	-0,77	0,77	2,02	2,86	0,84	0,84	1,47	1,93	0,46	0,46
P2	2	7	2,47	1,51	-0,96	0,96	1,13	1,34	0,21	0,21	3,33	3,67	0,34	0,34	1,96	2,70	0,74	0,74
	3	8	3,10	1,48	-1,62	1,62	1,57	1,55	-0,02	0,02	3,12	4,40	1,28	1,28	1,80	3,26	1,46	1,46
	4	9	2,92	2,24	-0,68	0,68	1,51	1,56	0,05	0,05	2,62	4,52	1,90	1,90	2,06	3,31	1,25	1,25
	5	10	2,46	2,99	0,53	0,53	1,94	1,35	-0,59	0,59	2,71	4,47	1,76	1,76	1,96	3,06	1,10	1,10
	6	11	3,85	3,72	-0,13	0,13	2,24	1,17	-1,07	1,07	2,15	3,72	1,57	1,57	1,69	2,57	0,88	0,88
	7	12	4,09	4,05	-0,04	0,04	1,93	1,07	-0,86	0,86	1,80	2,68	0,88	0,88	1,24	1,83	0,59	0,59
P3	2	13	3,27	1,75	-1,52	1,52	1,48	1,43	-0,05	0,05	3,26	3,80	0,54	0,54	1,73	2,83	1,10	1,10
	3	14	2,42	1,64	-0,78	0,78	0,95	1,54	0,59	0,59	2,74	4,29	1,55	1,55	1,74	3,23	1,49	1,49
	4	15	2,96	2,50	-0,46	0,46	2,03	1,42	-0,61	0,61	2,90	4,16	1,26	1,26	2,03	3,16	1,13	1,13
	5	16	3,50	3,27	-0,23	0,23	2,27	1,50	-0,77	0,77	2,62	4,04	1,42	1,42	2,14	2,89	0,75	0,75
	6	17	3,30	3,70	0,40	0,40	1,67	1,31	-0,36	0,36	1,84	3,42	1,58	1,58	1,72	2,37	0,65	0,65
	7	18	4,43	3,96	-0,47	0,47	1,94	1,30	-0,64	0,64	1,76	2,41	0,65	0,65	1,22	1,66	0,44	0,44

Sondas			Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3				Cenário 4			
			HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)
P4	2	19	3,40	1,83	-1,57	1,57	1,27	1,27	0,00	0,00	3,49	3,59	0,10	0,10	2,11	2,81	0,70	0,70
	3	20	2,53	1,95	-0,58	0,58	1,87	1,49	-0,38	0,38	3,01	3,86	0,85	0,85	1,82	3,10	1,28	1,28
	4	21	2,17	2,90	0,73	0,73	1,73	1,71	-0,02	0,02	3,21	3,93	0,72	0,72	2,32	3,15	0,83	0,83
	5	22	3,93	3,43	-0,50	0,50	1,96	1,81	-0,15	0,15	2,44	3,69	1,25	1,25	1,72	2,72	1,00	1,00
	6	23	5,01	3,69	-1,32	1,32	2,7	1,39	-1,31	1,31	3,04	3,14	0,10	0,10	2,48	2,21	-0,27	0,27
	7	24	4,02	3,80	-0,22	0,22	2,44	1,55	-0,89	0,89	2,57	2,27	-0,30	0,30	1,93	1,59	-0,34	0,34
P5	2	25	2,92	2,00	-0,92	0,92	1,49	1,07	-0,42	0,42	3,83	3,79	-0,04	0,04	2,17	2,36	0,19	0,19
	3	26	2,85	1,94	-0,91	0,91	1,71	1,56	-0,15	0,15	3,81	3,17	-0,64	0,64	2,20	2,81	0,61	0,61
	4	27	2,10	2,27	0,17	0,17	2,22	1,80	-0,42	0,42	4,04	3,37	-0,67	0,67	2,84	3,07	0,23	0,23
	5	28	2,69	3,04	0,35	0,35	2,37	2,03	-0,34	0,34	2,80	3,46	0,66	0,66	2,98	2,89	-0,09	0,09
	6	29	3,12	3,21	0,09	0,09	2,79	1,40	-1,39	1,39	1,99	3,34	1,35	1,35	2,41	2,58	0,17	0,17
	7	30	2,57	3,28	0,71	0,71	2,25	1,09	-1,16	1,16	2,22	2,69	0,47	0,47	2,24	1,92	-0,32	0,32
P6	2	31	2,62	2,06	-0,56	0,56	1,63	1,42	-0,21	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	32	2,20	1,84	-0,36	0,36	1,11	1,42	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	33	2,29	2,27	-0,02	0,02	1,21	1,89	0,68	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	34	1,97	2,63	0,66	0,66	2,28	1,72	-0,56	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	35	1,81	2,75	0,94	0,94	1,46	1,10	-0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	36	1,70	2,89	1,19	1,19	1,35	1,67	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo F

Resultados situação com recife

Sondas			Cenário 5				Cenário 6				Cenário 7				Cenário 8			
			HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)
P1	2	1	3,75	1,81	-1,94	1,94	1,80	1,32	-0,48	0,48	2,65	3,80	1,15	1,15	1,78	2,78	1,00	1,00
	3	2	2,54	1,74	-0,80	0,80	1,66	1,61	-0,05	0,05	2,58	4,58	2,00	2,00	1,75	3,42	1,67	1,67
	4	3	2,35	1,57	-0,78	0,78	1,84	1,70	-0,14	0,14	2,22	4,68	2,46	2,46	1,73	3,41	1,68	1,68
	5	4	2,44	2,36	-0,08	0,08	1,58	1,63	0,05	0,05	2,26	5,06	2,80	2,80	1,71	3,58	1,87	1,87
	6	5	3,41	3,16	-0,25	0,25	2,03	1,55	-0,48	0,48	2,24	4,41	2,17	2,17	1,44	3,21	1,77	1,77
	7	6	4,02	3,64	-0,38	0,38	2,34	1,26	-1,08	1,08	1,96	2,99	1,03	1,03	1,30	2,26	0,96	0,96
	2	7	2,48	2,01	-0,47	0,47	1,06	1,50	0,44	0,44	2,96	3,67	0,71	0,71	1,93	2,74	0,81	0,81
P2	3	8	3,01	1,83	-1,18	1,18	1,87	1,64	-0,23	0,23	2,63	4,35	1,72	1,72	1,94	3,28	1,34	1,34
	4	9	2,84	1,96	-0,88	0,88	1,61	1,75	0,14	0,14	2,50	4,42	1,92	1,92	2,07	3,36	1,29	1,29
	5	10	2,57	2,77	0,20	0,20	1,60	1,61	0,01	0,01	1,82	4,58	2,76	2,76	1,62	3,32	1,70	1,70
	6	11	3,64	3,56	-0,08	0,08	2,17	1,58	-0,59	0,59	1,80	4,05	2,25	2,25	1,24	3,06	1,82	1,82
	7	12	3,96	3,96	0,00	0,00	2,09	1,47	-0,62	0,62	2,17	2,76	0,59	0,59	1,38	2,16	0,78	0,78
	2	13	2,73	2,28	-0,45	0,45	1,53	1,41	-0,12	0,12	3,05	3,71	0,66	0,66	2,00	2,80	0,80	0,80
P3	3	14	2,39	1,97	-0,42	0,42	1,43	1,69	0,26	0,26	2,96	4,32	1,36	1,36	2,14	3,37	1,23	1,23
	4	15	2,30	2,09	-0,21	0,21	1,46	1,71	0,25	0,25	1,63	4,25	2,62	2,62	1,56	3,38	1,82	1,82
	5	16	2,56	3,05	0,49	0,49	1,89	1,83	-0,06	0,06	1,97	4,18	2,21	2,21	1,72	3,15	1,43	1,43
	6	17	4,17	3,62	-0,55	0,55	2,34	1,69	-0,65	0,65	1,88	3,76	1,88	1,88	1,44	2,84	1,40	1,40
	7	18	0,00	3,94	3,94	3,94	8,00	1,62	-6,38	6,38	2,08	2,43	0,35	0,35	1,83	1,85	0,02	0,02
P4	2	19	3,52	2,93	-0,59	0,59	1,59	1,58	-0,01	0,01	3,60	3,72	0,12	0,12	2,37	3,07	0,70	0,70
	3	20	2,75	1,84	-0,91	0,91	1,32	1,97	0,65	0,65	2,97	3,90	0,93	0,93	2,24	3,18	0,94	0,94
	4	21	2,16	2,44	0,28	0,28	1,61	1,57	-0,04	0,04	2,21	3,73	1,52	1,52	1,83	3,09	1,26	1,26
	5	22	2,48	3,48	1,00	1,00	2,18	1,93	-0,25	0,25	2,19	3,67	1,48	1,48	1,84	2,81	0,97	0,97
	6	23	3,41	4,04	0,63	0,63	2,60	2,01	-0,59	0,59	2,31	3,76	1,45	1,45	2,00	2,88	0,88	0,88
	7	24	2,07	4,04	1,97	1,97	1,62	1,85	0,23	0,23	2,02	2,37	0,35	0,35	1,83	1,82	-0,01	0,01

Sondas			Cenário 5				Cenário 6				Cenário 7				Cenário 8			
			HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)	HS laboratório (m)	HS Swash (m)	Diferença (m)	Diferença Absoluta (m)
P5	2	25	3,03	2,29	-0,74	0,74	1,15	1,50	0,35	0,35	3,52	3,49	-0,03	0,03	1,56	2,65	1,09	1,09
	3	26	2,89	2,45	-0,44	0,44	1,35	1,62	0,27	0,27	3,13	3,25	0,12	0,12	1,78	2,90	1,12	1,12
	4	27	1,35	2,09	0,74	0,74	1,82	1,47	-0,35	0,35	1,58	3,31	1,73	1,73	2,03	2,83	0,80	0,80
	5	28	1,81	2,82	1,01	1,01	1,63	2,00	0,37	0,37	1,36	3,36	2,00	2,00	1,09	2,89	1,80	1,80
	6	29	2,29	3,58	1,29	1,29	2,01	2,48	0,47	0,47	1,65	3,15	1,50	1,50	1,46	2,61	1,15	1,15
	7	30	2,15	3,34	1,19	1,19	1,74	1,61	-0,13	0,13	1,92	3,05	1,13	1,13	2,50	2,43	-0,07	0,07
P6	2	31	1,84	2,08	0,24	0,24	1,39	1,37	-0,02	0,02	2,50	2,68	0,18	0,18	2,37	2,23	-0,14	0,14
	3	32	1,35	2,33	0,98	0,98	1,48	1,19	-0,29	0,29	1,60	2,65	1,05	1,05	1,62	2,59	0,97	0,97
	4	33	1,19	1,98	0,79	0,79	1,62	1,92	0,30	0,30	1,62	2,61	0,99	0,99	1,57	2,39	0,82	0,82
	5	34	2,08	2,61	0,53	0,53	1,90	2,19	0,29	0,29	2,10	2,25	0,15	0,15	1,98	2,08	0,10	0,10
	6	35	1,66	2,77	1,11	1,11	1,43	1,60	0,17	0,17	1,31	2,64	1,33	1,33	1,40	2,27	0,87	0,87
	7	36	1,51	2,81	1,30	1,30	1,34	1,51	0,17	0,17	1,67	2,77	1,10	1,10	1,97	2,23	0,26	0,26

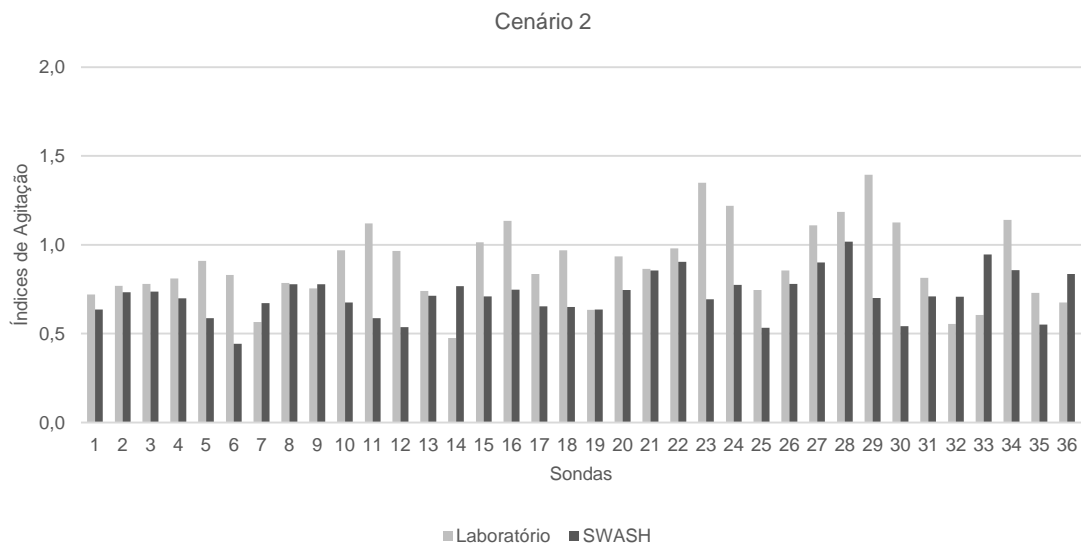
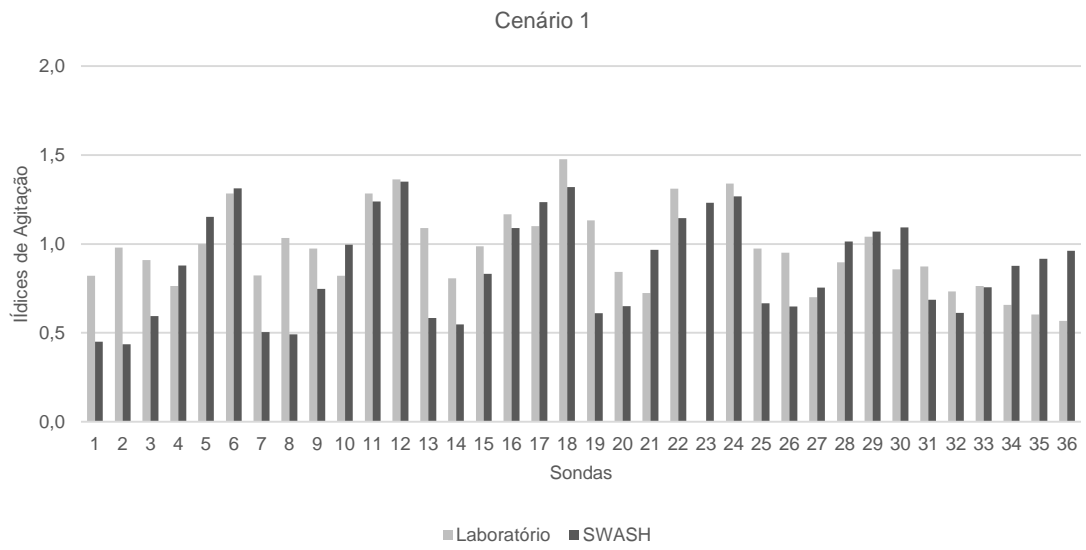
Anexo G

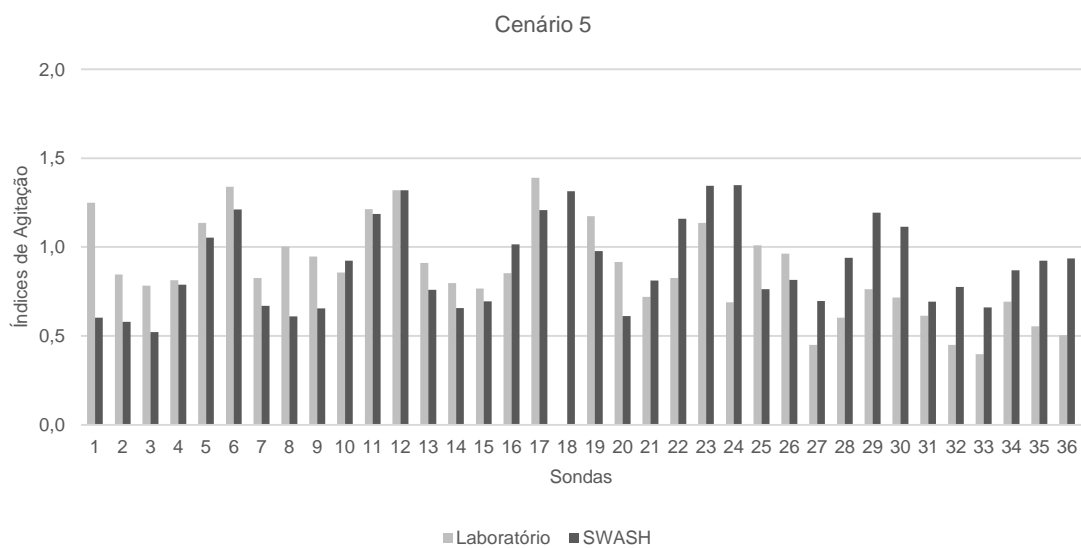
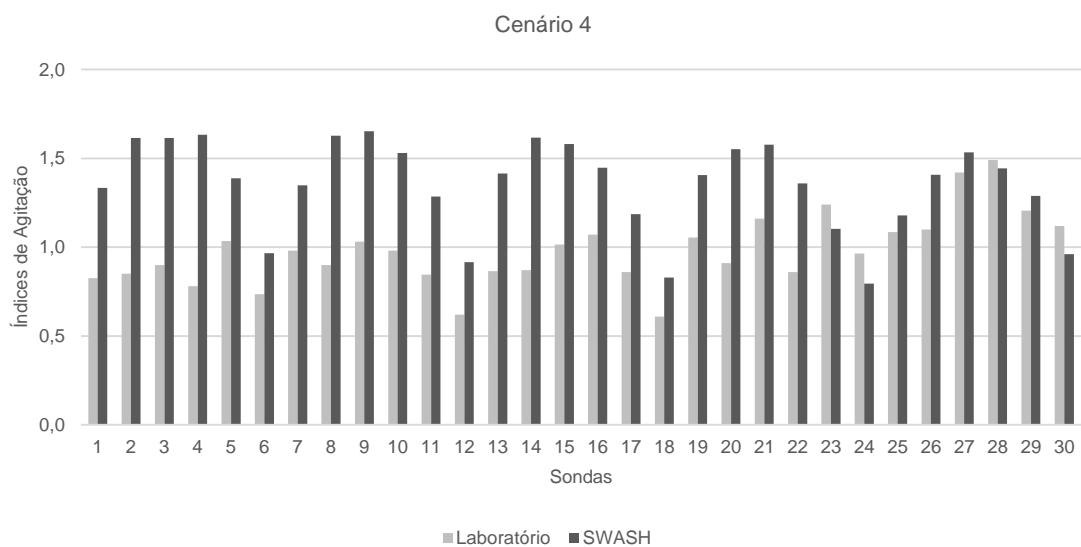
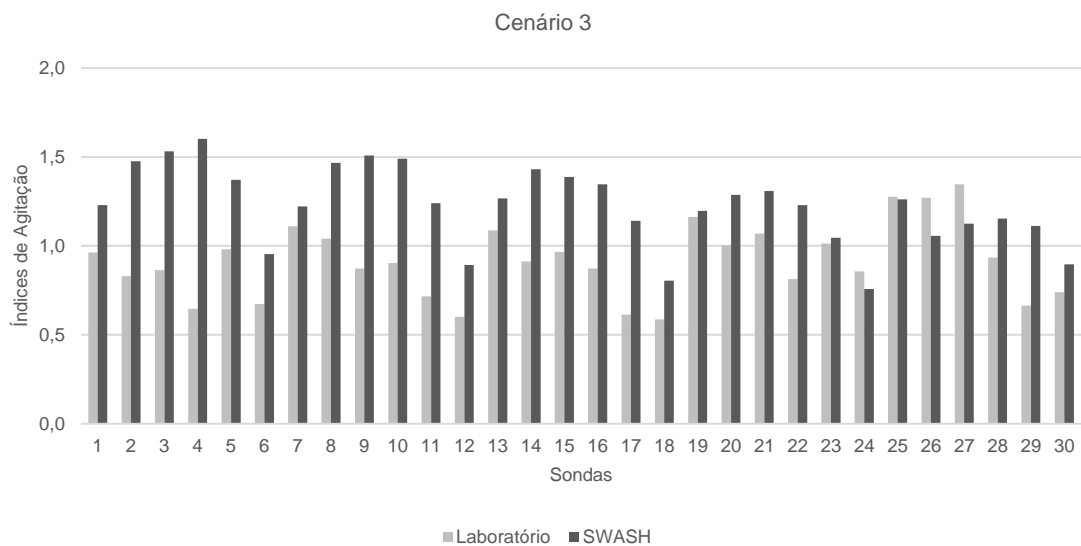
Resultados para a introdução gradual dos vários parâmetros – Exemplo com valores *scatter index*

		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8			
Geração 0 metros		Sem atrito/sem Sponge Layer/ Sem viscosidade	0		0,38	3,34			0,53				
Geração 900 metros	Atrito 0,018		1	0,19	0,38	0,61	0,83	0,30	0,45	0,90	0,96		
	Atrito 0,017		2	0,22	0,38	0,63	0,82	0,31	0,48	0,92	0,97		
	Atrito 0,020		3	0,22	0,37	0,62	0,83	0,34	0,44	0,96	0,94		
	atrito 0,018	Sponge layer Este (6 m)		4	0,19	0,38	0,61	0,83	0,30	0,46	0,95	0,96	
		Sponge layer Norte+Este (6 m)		5		0,28	0,67	0,87	0,35	0,21	0,97	0,90	
		Sponge layer Sul+Este (6 m)		6				0,63					
		Sponge layer Norte+Este+Sul (6 m)		7									
		Sponge layer E	(Rump Function) - Somothing 5,5 min		8	0,32	0,46	0,63	0,69	0,38	0,50	0,94	0,81
			Mixing 0,02		9	0,18	0,39	0,64	0,84	0,38			0,96
			Viscosidade Horizontal 0,06		10	0,18	0,41	0,60	0,83	0,26	0,35	0,68	0,69
	Sem Geração ao Largo		11	0,21		2,58	3,49	0,35					
Geração 1200	Atrito 0,018		12	0,12	0,19	0,45	0,55	0,38	0,37	0,71	0,68		
	Atrito 0,017		13	0,10	0,18	0,51	0,57	0,47	0,40	0,71	0,68		
	Atrito 0,020		14	0,13	0,19	0,46	0,52	0,35	0,36	0,66	0,68		
	atrito 0,018	Sponge layer Este (6 m)		15	0,14	0,19	0,46		0,36	0,37	0,70	0,63	
		Sponge layer Norte+Este (6 m)		16	0,27	0,17	0,62	0,72	0,27	0,25	0,80	0,74	
		Sponge layer Sul+Este (6 m)		17							0,42		
		Sponge layer Norte+Este+Sul (6 m)		18							0,68	0,12	
		Sponge layer E	(Rump Function) -Somothing 5,5 min		19	0,21	0,35	0,40	0,46	0,43	0,46	0,68	0,64
			Viscosidade Mixing 0,02		20	0,13	0,20	0,47	0,58	0,32	0,41	0,65	0,63
			Viscosidade Horizontal 0,06		21	0,29	0,22	0,25	0,37	0,27	0,30	0,48	0,51
	Sem Geração ao Largo		22	0,24		0,57							

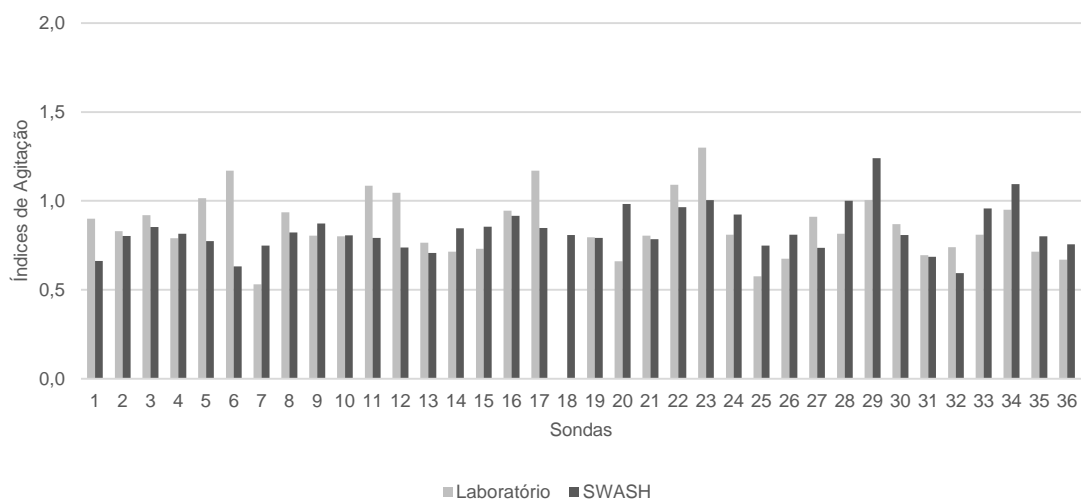
 Sem Resultados

Anexo H

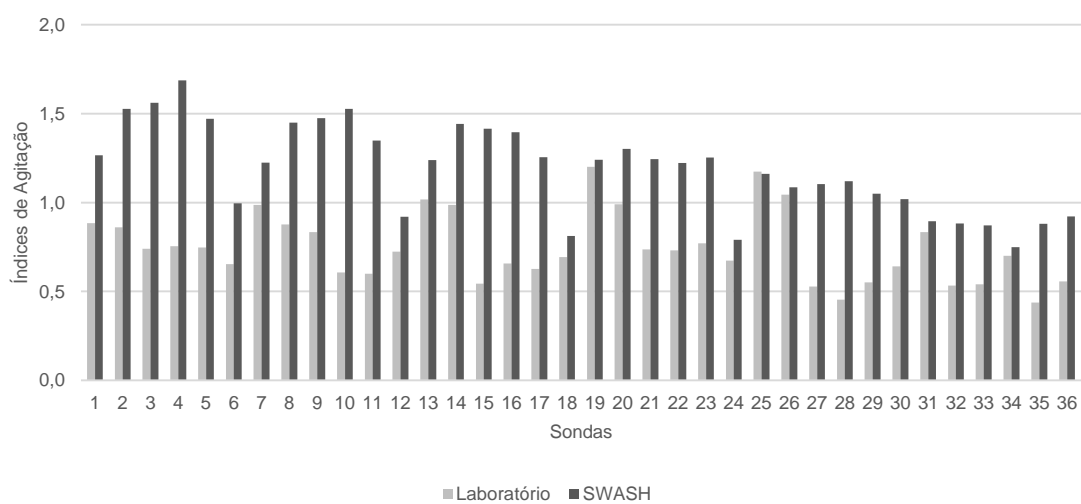




Cenário 6



Cenário 7



Cenário 8

