



**Universidade de
Aveiro
2009**

Departamento de Física

**BÁRBARA DA LUZ ESTUDO NUMÉRICO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS
LOURAÇO ROCHA DE NO RECIFE ARTIFICIAL DE S. PEDRO DO ESTORIL
AZEVEDO PROENÇA**



**BÁRBARA DA LUZ
LOURAÇO ROCHA DE
AZEVEDO PROENÇA**

**ESTUDO NUMÉRICO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS
NO RECIFE ARTIFICIAL DE S. PEDRO DO ESTORIL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica da Doutora. Juana Fortes, Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e co-orientação do Doutor Paulo Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Este estudo foi desenvolvido no âmbito dos projectos BRISA – BReaking waves and Induced SAnd transport, PTDC/ECM/67411/2006 e Novos Conceitos de protecção para a costa portuguesa PTDC/ECM/66516/2006.

o júri

presidente

Prof. Dr. Alfredo Moreira Caseiro Rocha

professor associado com agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Dr^a. Conceição Juana Espinosa Morais Fotes

investigadora principal do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Dr. Paulo Manuel da Cruz Alves da Silva

professor auxiliar do departamento de Física da Universidade de Aveiro

Dr^a. Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves

investigadora auxiliar do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

agradecimentos

À Câmara Municipal de Cascais, a autorização para apresentação dos resultados com os ensaios em modelo físico.

À minha orientadora, Eng^a. Juana Fortes pela disponibilidade e por tudo o que me ensinou ao longo deste estágio.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Silva também pela disponibilidade, apoio e especialmente pelo facto de me ter possibilitado este estágio.

À Ana a preciosa ajuda e disponibilidade ao longo deste projecto.

Ao Gonçalo e ao Mário pelo apoio informático.

Ao Ilmer por todo o apoio, paciência e dificuldades que me ajudou a ultrapassar, não só durante este período mas ao longo destes últimos anos.

À Cristina pela documentação fotográfica da nossa visita à praia de S. Pedro do Estoril.

À minha família por estarem sempre presentes.

Finalmente, a toda a gente que de alguma forma contribuiu para a minha formação académica.

palavras-chave

COULWAVE, modelação numérica, modelação física, recife artificial, surf, S. Pedro do Estoril.

resumo

O presente trabalho descreve a aplicação do modelo numérico de propagação de ondas COULWAVE ao estudo da propagação de ondas sobre o recife artificial para o surf a ser implantado na praia de São Pedro do Estoril.

Os resultados obtidos são validados recorrendo a dados provenientes de ensaios em modelo físico, previamente realizados. A análise comparativa entre resultados numéricos e experimentais é efectuada em termos de séries temporais de elevação da superfície livre, alturas de onda e índices de agitação, para algumas condições de agitação incidente. Com base nos resultados numéricos são também calculados dois parâmetros de surfabilidade (ângulo de rebentação e número de Iribarren) que caracterizam o funcionamento do recife artificial para o surf.

São tiradas conclusões sobre o desempenho do modelo numérico para o caso de estudo apresentado.

keywords

COULWAVE, numerical modelling, physical modelling, artificial reef, surf, S. Pedro do Estoril.

abstract

The present paper presents the application of the numerical wave model COULWAVE to the study of the implementation of an artificial surfing reef at the São Pedro do Estoril beach.

The obtained results are validated with data from previously performed tests with a physical model. The comparison analysis between numerical and experimental results is based on time series of free surface elevation, wave height and breaking indexes. Surfability parameters (peel angle and Iribarren number) are calculated based upon the numerical results.

Conclusions are obtained about the performance of the numerical model for the case study here presented.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objectivos do presente trabalho.....	2
3. Recifes artificiais	3
3.1. Condições necessárias à construção de um recife	3
3.2. Parâmetros de dimensionamento de um recife	4
4. Descrição do local de estudo	5
5. Modelação física	6
5.1. Introdução	6
5.2. Descrição dos ensaios em modelo físico.....	7
5.2.1. Condições de ensaio.....	7
5.2.2. Condições de agitação.....	8
5.2.3. Medições efectuadas	9
5.3. Tratamento de resultados	10
5.3.1. Apresentação e análise dos resultados de ensaios com ondas regulares.....	11
5.3.2. Apresentação e análise dos resultados de ensaios com ondas irregulares.....	16
6. Modelação numérica	21
6.1. Breve historial	21
6.2. Descrição do modelo numérico	21
6.2.1. Modelo do atrito de fundo.....	23
6.2.2. Modelo de rebentação.....	23
6.2.3. Ficheiros de entrada e de saída.....	24
6.3. Metodologia adoptada.....	25
6.4. Condições de cálculo	27
6.5. Testes de sensibilidade.....	27
6.5.1. Análise de sensibilidade ao parâmetro de rebentação	28
6.5.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro do atrito de fundo	29
6.6. Comparação com resultados experimentais.....	29
6.6.1. Séries de elevação da superfície livre P3 e P4.....	30
6.6.2. Índices de agitação	30
6.7. Parâmetros de surfabilidade	34
6.7.1. Metodologia de cálculo.....	34
6.7.2. Número de Iribarren	35
6.7.3. Ângulo de rebentação	36
7. Discussão e Conclusão	37
8. Bibliografia.....	39
Anexo I. Ondas Irregulares - Modelo Físico.....	41
Anexo II. Figuras das alturas de onda e índices de agitação para ondas irregulares obtidos em modelo físico	45

Lista de figuras

Figura 1 – a,b) Localização da praia de São Pedro do Estoril; identificação do ponto P4; c) Zona de implantação do recife artificial para o surf; d) local de implantação do recife; e) Ponta do Sal.....	5
Figura 2 – a) Batimetria e direcções de onda consideradas; b) Modelo físico sem o recife; c) Modelo físico com o recife; d) Quadricula implementada no modelo físico.....	7
Figura 3 – Representação esquemática da geometria do recife adoptada (Bicudo <i>et al.</i> , 2007).....	8
Figura 4 – Sondas resistivas utilizadas para medir a elevação da superfície livre.....	9
Figura 5 – a) Quadrícula de pontos; b) Identificação das secções de pontos.....	9
Figura 6 – Exemplo de resultados, nos pontos de medição: a) Altura de onda significativa; b) Índices de agitação (Fortes <i>et al.</i> ,2007b).....	10
Figura 7 – Secções transversais S1 a S7.	11
Figura 8 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=11s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.	13
Figura 9 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=15s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.	13
Figura 10 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=19s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$; rosa – $H_0=6m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.....	14
Figura 11 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=11s$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$; rosa – $H_0=6m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.....	14
Figura 12 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=15s$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.....	15
Figura 13 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=19s$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.	15
Figura 14 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	17
Figura 15 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	17
Figura 16 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	18
Figura 17 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	18

Figura 18– Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	19
Figura 19 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.	19
Figura 20 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	20
Figura 21 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.....	20
Figura 22 – Comparação das versões 2005 (azul) e 2008 (vermelho) do modelo COULWAVE relativamente aos resultados do modelo físico (preto). $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré. a) secção 4; b) secção 5.....	26
Figura 23 - Domínio computacional considerado ilustrando os contornos batimétricos e as fronteiras.....	27
Figura 24 – Comparação dos valores do índice de agitação obtidos para $\zeta_t^{(l)}=0.65$ (azul) e $\zeta_t^{(l)}=0.35$ (vermelho), para as secções a) S4; b) S5; c) S6. $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas; os pontos pretos representam o modelo físico.....	28
Figura 25 – Comparação dos valores $f=0.01$ (azul), $f=0.005$ (verde) e $f=0.001$ (vermelho) para o parâmetro do atrito de fundo para as secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas; os pontos pretos representam o modelo físico.....	29
Figura 26 – Séries temporais de elevação da superfície livre para a posição P3 nas sondas a) s1; b) s3; c) s4; d) s5; e) s6. Preto – modelo físico; vermelho – modelo numérico. $T=15s$, $H=2m$; $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré.....	31
Figura 27 – Séries temporais de elevação da superfície livre para a posição P4 nas sondas a) s1; b) s3; c) s4; d) s5; e) s6. Preto – modelo físico; vermelho – modelo numérico. $T=15s$, $H=2m$; $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré.....	32
Figura 28 – Comparação de resultados numéricos (azul) e experimentais (vermelho), em termos de índices de agitação, para as secções: a) S3; b) S4; c) S5; d) S6. $T=19s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas.....	33
Figura 29 – Comparação de resultados numéricos (azul) e experimentais (vermelho), em termos de índices de agitação, para as secções: a) S3; b) S4; c) S5; d) S6. $T=19s$, $H=3m$, $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas.....	33
Figura 30 – Velocidade média (m/s) da corrente no domínio sobre o recife. $T=19s$ $H=2m$, $\theta=220^\circ$, nível médio de maré.....	34
Figura 31 – Alturas de onda significativa (m) na região do recife. a) $T=11s$ $H_0=2m$; b) $T=15s$, $H_0=2m$; c) $T=19s$ $H_0=3m$. $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré.	35
Figura 32 – Zonas de rebentação. a) $T=15s$ $H=2m$; b) $T=19s$ $H=2m$ c) $T=19s$ $H=3m$; $\theta=220$. Nível médio de maré.....	35
Figura 33 – Comparação do número de Iribarren para os três períodos de onda testados para $H=2m$ $\theta=220$. Nível médio de maré.	36

Figura 34 – Ângulos de rebentação para: a) $T=11s$ $H=2m$; b) $T=15s$, $H=2m$; c) $T=19s$, $H=3m$. $\theta=220$. Nível médio de maré. 37

Figura AI.1 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 41

Figura AI.2 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 41

Figura AI.3 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 42

Figura AI.4 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 42

Figura AI.5 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 43

Figura AI.6 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 43

Figura AI.7 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 44

Figura AI.8 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas. 44

Figura AII.1 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 45

Figura AII.2 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 45

Figura AII.3 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível médio. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 46

Figura AII.4 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível médio. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 46

Figura AII.5 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível Preia-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 47

Figura AII.6 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 220° . Nível Preia-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 47

Figura AII.7 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 235° . Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 48

Figura AII.8 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 235° . Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 48

Figura AII.9 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11s$, $H=3m$ e $H=4m$, direcção incidente de 235° . Nível médio. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação. 49

Figura All.10 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15$ s $H=3$ m e $H=4$ m, direcção incidente de 235° Nível médio. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.	49
Figura All.11 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11$ s $H=3$ m e $H=4$ m, direcção incidente de 235° Preia-mar. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.	50
Figura All.12 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15$ s $H=3$ m e $H=4$ m, direcção incidente de 235° Preia-mar. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Método de Walker (1974) para a relação entre o ângulo de rebentação e o nível de dificuldade da onda.	4
Tabela 2 – Metodologia de Battjes (1974) para a classificação do tipo de rebentação segundo o valor do número de Iribarren.	5
Tabela 3 – Características gerais do regime de agitação marítima na zona adjacente à Praia de São Pedro do Estoril (*convenção náutica).	6
Tabela 4 – Condições de agitação marítima testadas no modelo físico.....	8
Tabela 5 – Tempos de CPU (s) do modelo numérico.....	30

1.Introdução

O aumento da importância da prática de surf nos últimos 30 anos, levou a Câmara Municipal de Cascais (C.M.C.) a promover um estudo de viabilidade de implementação de um recife artificial para o surf na região da praia de S. Pedro do Estoril. Para tal, formalizou-se um protocolo entre a C.M.C., o Instituto Superior Técnico (I.S.T.) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Fortes *et al.*, 2007a,c; 2008; Neves *et al.*, 2007 e Bicudo e Cardoso, 2007a,b).

Este estudo incluía uma componente de modelação numérica, uma componente de modelação física e uma componente de avaliação de impacto ambiental.

A componente de modelação numérica envolveu o estudo do funcionamento de diversas soluções propostas para o recife (Fortes *et al.*, 2008), através da utilização do modelo REFDIF (Dalrymple e Kirby, 1991), um modelo parabólico, baseado nas equações de *mild-slope* e de características lineares. A componente de modelação física compreendeu o ensaio em modelo físico da localização e geometria do recife escolhida (Bicudo e Cardoso, 2007b; Bicudo *et al.*, 2007), nas instalações do LNEC.

Sendo o modelo REFDIF um modelo relativamente simples devido às suas características lineares, julgou-se então interessante aplicar, a este mesmo caso, um modelo mais complexo, o modelo COULWAVE, (Lynett e Liu, 2004), baseado nas equações de Boussinesq, e comparar com os resultados experimentais anteriormente obtidos. Avalia-se deste modo o desempenho do modelo na simulação da propagação de ondas sobre o recife artificial de S. Pedro do Estoril para um conjunto de condições incidentes. Utiliza-se também os resultados do modelo numérico para caracterização dos parâmetros de surfabilidade.

A presente tese está estruturada em 7 capítulos. Depois dos objectivos e metodologia do trabalho, apresentados no capítulo 2, e uma breve introdução sobre aspectos a considerar no estudo de recifes artificiais (capítulo 3), apresenta-se no capítulo 4 a descrição do local de estudo. Segue-se o capítulo 5 sobre o estudo de modelação física efectuado no LNEC onde se descreve a instalação experimental, condições de agitação testadas, medições efectuadas. Apresenta-se também a análise efectuada, no âmbito do presente trabalho, dos resultados de modelo físico para condições de agitação regular e irregular.

O capítulo 6, é dedicado à aplicação do modelo COULWAVE ao caso em estudo, nomeadamente é apresentada uma descrição geral do modelo numérico utilizado, e os testes de sensibilidade efectuados para avaliação das melhores condições de aplicação do modelo. Ainda neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o modelo numérico e a sua comparação com os resultados provenientes do modelo físico. Calculam-se também com base nos resultados numéricos os parâmetros de surfabilidade. Segue-se então a discussão e conclusão deste estudo.

2.Objectivos do presente trabalho

O principal objectivo deste trabalho foi a análise do desempenho do modelo numérico COULWAVE, Lynett & Liu (2004), na simulação da propagação de ondas sobre o recife artificial a ser implantado em S. Pedro do Estoril. Para esta análise, dispunha-se de um conjunto de resultados experimentais de ensaios em modelo físico tridimensional anteriormente realizados no LNEC, Fortes *et al.* (2008), para ondas regulares e irregulares. Inicialmente, pretendia-se efectuar o estudo da resposta do modelo numérico tanto para as ondas regulares como para as irregulares, mas por questões de inviabilidade temporal, este foi apenas realizado para ondas regulares. A comparação dos resultados numéricos e experimentais é realizada em termos das séries de elevação da superfície livre e das respectivas alturas de onda (e índices de agitação) obtidas ao longo do domínio de cálculo, o que permite avaliar as potencialidades e limitações do modelo. Procedeu-se também, com base nos resultados numéricos, ao cálculo de parâmetros de surfabilidade (ângulo de rebentação e número de Iribarren) que caracterizam o funcionamento de um recife para o surf, para algumas condições de agitação incidente.

Para atingir os objectivos propostos, foi necessário efectuar um conjunto de tarefas que se enumeram de seguida:

1- Tratamento dos resultados da elevação da superfície livre de ensaios em modelo físico obtidos para condições de agitação regular e irregular;

2 – Familiarização com o modelo COULWAVE, nomeadamente com os ficheiros de entrada e saída, a sua estrutura e formato, através da aplicação do modelo aos casos propostos no manual deste programa;

3 – Testes de sensibilidade para o caso de estudo do recife artificial em S. Pedro do Estoril, para avaliar a(os) mais adequada(os):

- versão do modelo a utilizar (a de 2005 ou de 2008);
- características da malha de batimetria (dimensões, espaçamento) em função das condições de agitação incidente;
- parâmetros relacionados com o número de pontos por comprimento de onda a considerar, com o número de Courant e com o tempo total de simulação;
- parâmetros intrínsecos à formulação da rebentação e do atrito de fundo.

4 – Aplicação sistemática do modelo para condições de agitação regular testadas no modelo físico;

5 – Comparação de resultados numéricos e experimentais, em termos da elevação da superfície livre e de alturas de onda e índices de agitação, para avaliação do desempenho do modelo;

6 – Determinação dos parâmetros de surfabilidade com base nos resultados numéricos.

3. Recifes artificiais

Um recife artificial é uma estrutura submersa à qual podem estar associados dois objectivos, o melhoramento das condições de agitação marítima para a prática de surf e o seu funcionamento como elemento de protecção costeira. Quando o recife é dimensionado para cumprir estes dois objectivos é designado por recife artificial multifuncional. Para o presente caso de estudo, a implantação do recife artificial visa apenas melhorar as condições para o surf.

A introdução deste tipo de estruturas em engenharia costeira é bastante recente, datando a construção do primeiro recife artificial de 1999, em Cables, na Austrália (Fortes *et al.*, 2007b). Desde então, têm vindo a surgir diversos estudos para diferentes projectos de dimensionamento de recifes artificiais em vários locais, como é o caso do recife de Narrowneck, em Queensland, também na Austrália, cujo estudo se iniciou logo no ano seguinte, ou o Pratte's reef, Califórnia, E.U.A., dois anos mais tarde. Na Europa, só muito recentemente, em 2007, se iniciou um projecto para construção de um recife artificial, em Boscombe, Inglaterra, estando a sua conclusão prevista para Setembro de 2009 (BBC, 2007).

Em Portugal, apesar de já existir uma numerosa comunidade surfista, com tendência a crescer, não foi ainda construído nenhum recife artificial para este fim, estando no entanto, estudos a ser efectuados para alguns locais.

3.1. Condições necessárias à construção de um recife

Para a construção de um recife artificial para o surf, são necessários métodos e materiais diferentes dos tradicionalmente utilizados na construção dos quebra-mares convencionais (Jackson, 2001). Os recifes que proporcionem ondas consistentes e adequadas para a prática de surf têm de ser construídos tendo em consideração tolerâncias muito mais restritas do que no caso de quebra-mares convencionais.

Para garantir que as ondas tenham uma rebentação progressiva, é necessário evitar alterações bruscas na batimetria. Assim sendo, os recifes para o surf devem ter superfícies relativamente suaves, bem como declives relativamente pouco acentuados para atingir o empolamento da onda desejado (Jackson, 2001).

A segurança é um factor de extrema importância e portanto é fundamental o cuidado na escolha dos materiais utilizados e que estes sejam posicionados de forma a minimizar o risco para os surfistas.

O geotêxtil tem sido o material escolhido, já em diversos casos, para construção deste tipo de recifes por constituir uma estrutura que apresenta uma dureza relativamente bastante inferior às construídas em cimento e por ser um material favorável à proliferação de vida marinha, vegetal e, conseqüentemente, animal, o que leva a que, em pouco tempo o recife se encontre coberto de habitats de diversas espécies, tendo assim uma influência positiva no meio marinho.

3.2. Parâmetros de dimensionamento de um recife

Uma das principais funções de um recife artificial para surf é melhorar as condições de surf da zona. De uma forma genérica, pretende-se que esta estrutura induza ou melhore o tipo de rebentação, favoreça o aumento da altura de onda induzindo a rebentação num dado local e garanta que esta se efectue de forma gradual ao longo da crista da onda numa distância suficientemente longa.

No caso de recifes artificiais para a prática do surf, os parâmetros mais utilizados para análise do seu funcionamento são:

- A altura da onda ao longo da linha de rebentação;
- O ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação;
- O comprimento da linha de rebentação;
- A amplificação da altura da onda em relação à altura de onda incidente.

Estes parâmetros são designados como parâmetros de surfabilidade. Os parâmetros são, logicamente, dependentes uns dos outros e também do nível dos surfistas (experiência ou habilidade dos surfistas) para os quais se pretende dimensionar o recife. Embora as diferentes classificações para o nível dos praticantes de surf sejam subjectivas, existem várias classificações propostas, como, por exemplo, a de Walker (1974) e a de Hutt *et al.* (2001), ambas em função do ângulo de rebentação. O ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação é definido como o ângulo entre a crista da onda e a linha de rebentação, α :

$$\sin \alpha = \frac{c}{V_s} \quad (1)$$

onde c é a velocidade de fase de propagação da onda e V_s a velocidade do surfista. Seguindo a metodologia de Walker (1974), o ângulo de rebentação está associado ao nível de dificuldade na execução de manobras de surf ao longo da onda, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Método de Walker (1974) para a relação entre o ângulo de rebentação e o nível de dificuldade da onda.

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

O tipo de rebentação, determinado através do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação, ξ_b , é definido por:

$$\xi_b = \frac{s}{\sqrt{H_b/L_0}} \quad (2)$$

onde s é o declive do fundo na zona do recife, H_b a altura da onda na rebentação da onda e L_0 o comprimento de onda ao largo. Na Tabela 2, apresenta-se a classificação do tipo de rebentação em função do número de Iribarren, segundo Battjes (1974).

Nas seguintes secções, é descrito com maior pormenor o trabalho desenvolvido.

Tabela 2 – Metodologia de Battjes (1974) para a classificação do tipo de rebentação segundo o valor do número de Iribarren.

Tipo de rebentação	Número de Iribarren
Progressiva	$\xi_b < 0.4$
Mergulhante	$0.4 < \xi_b < 2.0$
De fundo	$\xi_b > 2.0$

4. Descrição do local de estudo

A praia de S. Pedro do Estoril (Figura 1) localizada no concelho de Cascais, Portugal, é constituída por um areal de 400 m de extensão e de largura variável entre 25 m e 35 m, ladeado por formações rochosas baixas. Esta praia possui boas condições para a prática de surf e é das mais antigas praias frequentadas por surfistas em Portugal: o seu clube de surf (Surfing Clube de Portugal – SCP) tem 30 anos de existência e já produziu atletas de renome nacional nas modalidades de Surf, Bodyboard, Longboard e Skimboard. (Fortes *et al.*, 2008; Mendonça *et al.*, 2009).

A análise da zona em estudo, das características da agitação existente e das características da rebentação que ocorre nessa zona, permitiu identificar um conjunto de quatro locais possíveis para a localização de um recife artificial. Estes locais estão delimitados a nascente pela zona de reserva biofísica da Praia das Avencas e a poente pela zona do Castelo Neogótico, junto a S. João do Estoril, (Bicudo *et al.*, 2007).

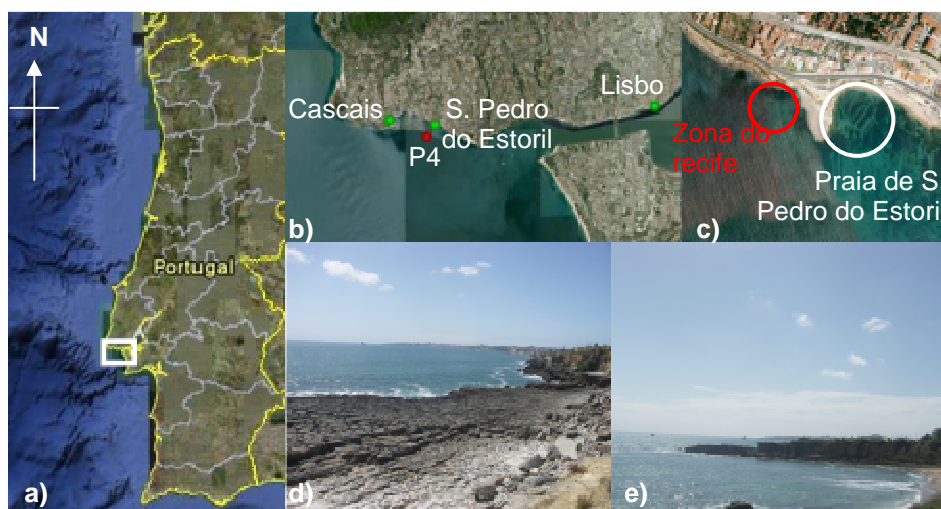


Figura 1 – a,b) Localização da praia de São Pedro do Estoril; identificação do ponto P4; c) Zona de implantação do recife artificial para o surf; d) local de implantação do recife; e) Ponta do Sal.

O local escolhido para o recife situa-se a poente da Ponta do Sal (Figura 1e). As razões para a escolha do local resultaram do facto de ser facultada a criação de uma nova zona de surf para surfistas experientes na praia de S. Pedro do Estoril (a poente da Ponta do Sal) de qualidade internacional, o que permitirá distribuir os surfistas por mais zonas da praia e oferecerá condições mais adequadas para a realização de campeonatos de surf. Para além disso, permitirá manter as zonas de surf já existentes, que já oferecem condições excelentes para a prática de surf de níveis iniciado e intermédio.

Em termos de clima de agitação marítima do local, e dado que não existem dados de agitação marítima disponíveis na zona da praia de São Pedro do Estoril, a definição do regime de agitação marítima para esta zona baseou-se em dados observados na Figueira da Foz, durante o período de Junho de 1990 a Fevereiro de 1996. Estes dados constam de valores tri-horários dos parâmetros altura significativa, H_s , período de zero ascendente, T_z e direcção da onda, θ .

Esses dados, observados ao largo da Figueira da Foz, foram transferidos para o largo e do largo para junto à zona marítima da Praia de São Pedro do Estoril, utilizando para tal a metodologia TRANSFER, Coli *et al.* (1999). Definiu-se assim, o regime geral observado ao largo da zona marítima da praia de São Pedro do Estoril, Fortes *et al.* (2007a), e mais concretamente no ponto P4 de coordenadas 38°40'56.2"N e 9°22'52.0"W à profundidade de 18.4 m (indicado na Figura 1b). Na Tabela 3 apresenta-se um resumo das principais características da agitação marítima nesse ponto.

Tabela 3 – Características gerais do regime de agitação marítima na zona adjacente à Praia de São Pedro do Estoril (*convensão náutica).

Ponto	Variáveis	Características	
		Gama	Gamas mais frequentes
P4	H_s	0.0 a 5.5m	0 a 2.0m
	T_z	3s a 17s	5s a 11s
	Direcção da onda	195° a 265°	235° e 255°

5. Modelação física

5.1. Introdução

O estudo em modelo físico da solução de recife seleccionada teve como objectivo a verificação do funcionamento hidrodinâmico dessa solução. Estes ensaios foram realizados nas instalações do LNEC, para diferentes condições de agitação incidente, de modo a avaliar as condições de rebentação sobre o recife e conseqüentemente, o seu desempenho para o surf.

Nas secções seguintes, efectua-se primeiramente uma descrição sumária dos ensaios realizados, de modo a permitir ao leitor a compreensão geral dos estudos realizados. Uma descrição mais detalhada pode ser consultada em Fortes *et al.* (2008) e Leite (2008).

Apresenta-se o tratamento e análise efectuados com base nos resultados obtidos no modelo físico, para condições de agitação regular e irregular incidente. Trata-se de um conjunto de dados experimentais bastante interessante para validação de modelos numéricos.

Note-se que apenas os resultados referentes à agitação regular serviram para a validação do modelo numérico COULWAVE. Com efeito, a validação deste com ondas irregulares envolvia um acréscimo significativo de volume de trabalho não compatível com o período de tempo associado a este trabalho. Esses resultados, no entanto, servem para a validação futura do modelo numérico, ou de outros.

5.2. Descrição dos ensaios em modelo físico

5.2.1. Condições de ensaio

Os ensaios experimentais em modelo físico foram efectuados no Pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais concretamente num tanque de ondas irregulares com uma área de 600m² (30 metros de comprimento por 20 metros de largura), ilustrado na Figura 2. Estes ensaios foram realizados com o propósito de analisar o funcionamento hidrodinâmico da solução de recife artificial proposta por Bicudo *et al.* (2007).

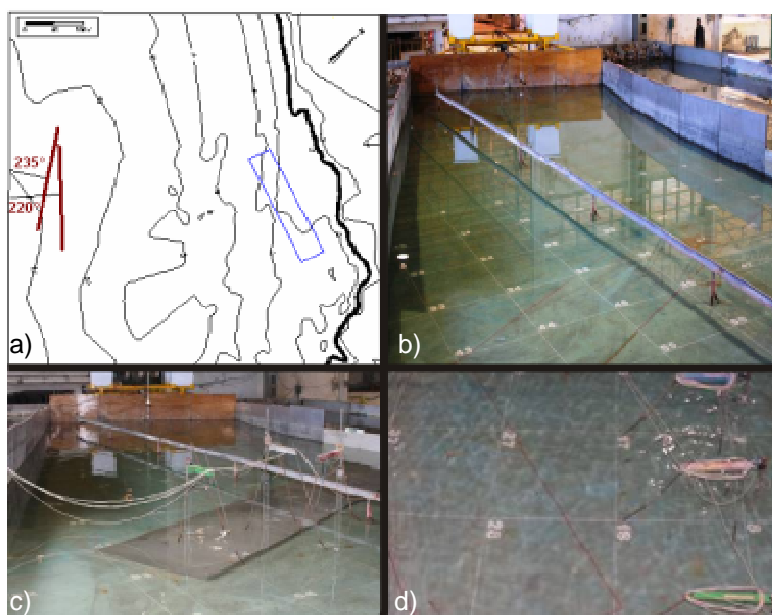


Figura 2 – a) Batimetria e direcções de onda consideradas; b) Modelo físico sem o recife; c) Modelo físico com o recife; d) Quadricula implementada no modelo físico.

Utilizou-se um gerador de ondas irregulares constituído por uma pá de 6m de comprimento e 0.80m de altura, tendo sido testadas duas posições para fazer variar a orientação da onda incidente (Figura 2b).

O modelo foi construído à escala geométrica de 1:30 respeitando a lei da semelhança de Froude. Tanto a batimetria, Figura 2a, como a envolvente do local em estudo foram reproduzidas de acordo com o protótipo, tendo sido representadas as batimétricas desde a cota de fundo de -10

metros até junto à costa. Implementou-se no fundo do modelo uma quadrícula com um espaçamento de 1m x 1m, para demarcar os pontos onde foi efectuada a aquisição de dados da elevação da superfície livre com as sondas resistivas, ilustrada na Figura 2d.

A geometria do recife utilizada (Figura 3), seleccionada a partir de estudos prévios em modelo numérico, foi definida por Bicudo *et al.* (2007) e implementada no modelo físico.

Efectuaram-se ensaios para as situações sem e com recife artificial (Figura 2b e 2c, respectivamente).

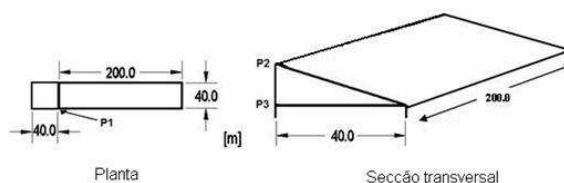


Figura 3 – Representação esquemática da geometria do recife adoptada (Bicudo *et al.*, 2007).

5.2.2. Condições de agitação

Os níveis de maré e as condições de agitação incidentes a ser testadas foram também definidas por Bicudo e Cardoso (2007b), com base no regime de agitação marítima obtido e nos resultados da propagação de ondas desde o largo até à batimétrica correspondente à profundidade máxima que se reproduziu no modelo físico (-10m). Foram consideradas algumas condições que, mesmo não sendo as mais frequentes nesta zona, foram apontadas como sendo as mais interessantes no que diz respeito ao objectivo deste trabalho, mais precisamente, as referentes aos períodos de onda mais elevados, i.e., 15s e 19s.

Para cada uma destas situações, sem e com recife, fizeram-se ensaios para ondas regulares e irregulares, sendo a duração de 5 e 10 minutos à escala do modelo, respectivamente, correspondentes a 30 e 60 minutos à escala do protótipo. As condições de agitação regular e irregular, levadas a cabo nos ensaios experimentais para a situação sem recife artificial (desde que a rebentação não se tenha verificado antes do recife artificial), são apresentadas na Tabela 4.

Para as condições de agitação irregular, foi usado o espectro de JONSWAP com um factor de esbelteza de pico $\gamma=3.3$. T_p representa o período de pico.

Tabela 4 – Condições de agitação marítima testadas no modelo físico.

Agitação	Direcção	Nível de maré (m)	T (s)	H_s (m)
Regular	220° e 235°	+0.3 ZH	11	1 a 5
			15	1 a 5
			19	1 a 5
		+2.0 ZH	11	1 a 5
			15	1 a 5
			19	1 a 5
		+3.7 ZH	11	1 a 5 (220°) 1 a 6 (235°)
			15	1 a 5
			19	1 a 5 (220°) 1 a 6 (235°)

Agitação	Direcção	Nível de maré (m)	T _P (s)	H _S (m)
Irregular	220° e 235°	+0.3 ZH	11	3
			15	3
		+2.0 ZH	11	3 e 4
			15	3 e 4
		+3.7 ZH	11	3 e 4
			15	4 e 4

5.2.3. Medições efectuadas

Em cada ensaio, procedeu-se à medição da elevação da superfície livre em vários pontos do modelo. Para registar a elevação da superfície livre foram utilizadas sete sondas resistivas: a) uma posicionada em frente ao gerador de ondas (sonda 1) de modo a medir a elevação da superfície livre à cota -10m e garantir a repetitibilidade e o controle de qualidade dos ensaios efectuados; b) as outras seis (2 a 7) posicionadas numa linha paralela à pá do gerador, para cada ensaio, como é visível na Figura 4.

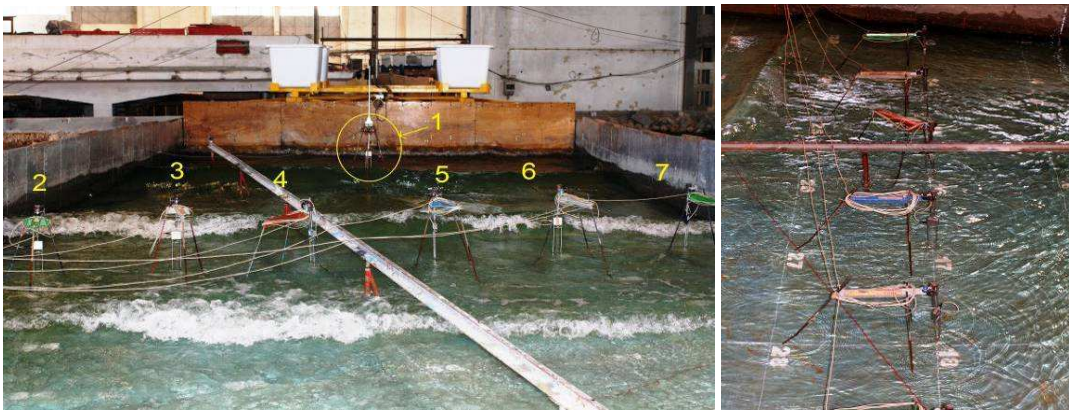


Figura 4 – Sondas resistivas utilizadas para medir a elevação da superfície livre.

Estas posições foram estabelecidas na quadrícula que foi desenhada no modelo. Assim, obtiveram-se valores da elevação da superfície livre em 36 localizações diferentes, Figura 5a, divididas em 6 grupos, designadas de P1 a P6, Figura 5b.

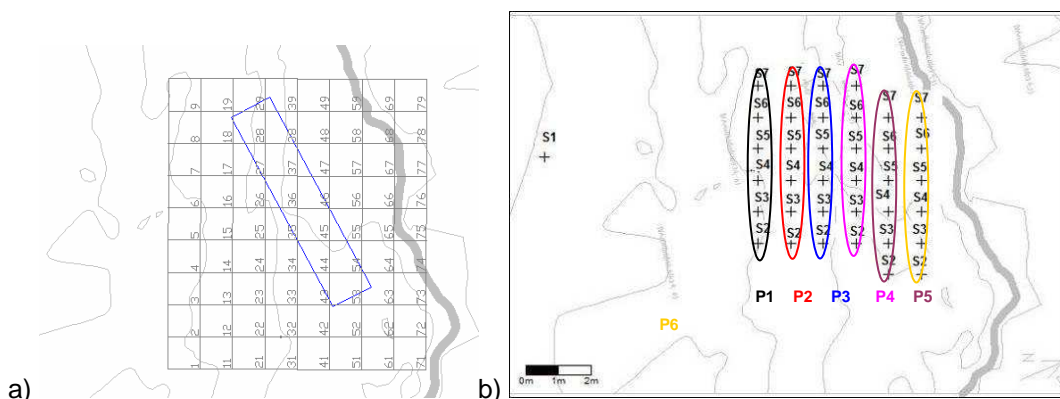


Figura 5 – a) Quadrícula de pontos; b) Identificação das secções de pontos.

É de salientar que para o nível de maré de baixa-mar, dada a pouca altura de água verificada sobre o recife, não foi possível efectuar medições nas posições P4, P5 e P6, devido a limitações dos equipamentos de medição (sondas resistivas).

Procedeu-se também à identificação da linha de rebentação de forma visual e à observação das condições de rebentação também visualmente, através de fotografias e filmes efectuados com três câmaras durante os ensaios.

5.3. Tratamento de resultados

Em Fortes *et al.* (2008), com base nos registos da elevação da superfície livre correspondentes à agitação regular, efectuou-se:

- Cálculo dos valores da altura de onda significativa, H_S , em cada ponto de medição, com base nos registos da elevação da superfície livre obtidos nas sete sondas colocadas na zona de implantação do recife artificial (36 pontos), Figura 6a. Para tal, utilizou-se o programa ANOIAGI (Carvalho, 1981).
- Cálculo dos valores do índice de agitação em cada ponto de medição. Os índices de agitação, H_S / H_0 , são dados pela relação entre a altura de onda medida em cada ponto, H_S , e a altura de onda medida no ponto à saída do gerador de ondas, H_0 , em cada ensaio do tipo Figura 6b. Utilizou-se o programa SOPRO_ANOIAGI (Pinheiro e Fortes, 2008).
- Análises da localização, do comprimento e do tipo de rebentação na zona do recife artificial, com base nas filmagens e fotografias efectuadas. Com base nesta análise foram efectuados quadros resumo das condições para as quais a rebentação ocorre a montante do recife em termos de alturas de onda mínimas.
- Figuras com a representação das linhas de rebentação, utilizando o programa SOPRO_CRIA_FIGURAS (Pinheiro e Fortes, 2008b) para cada condição de ensaio.

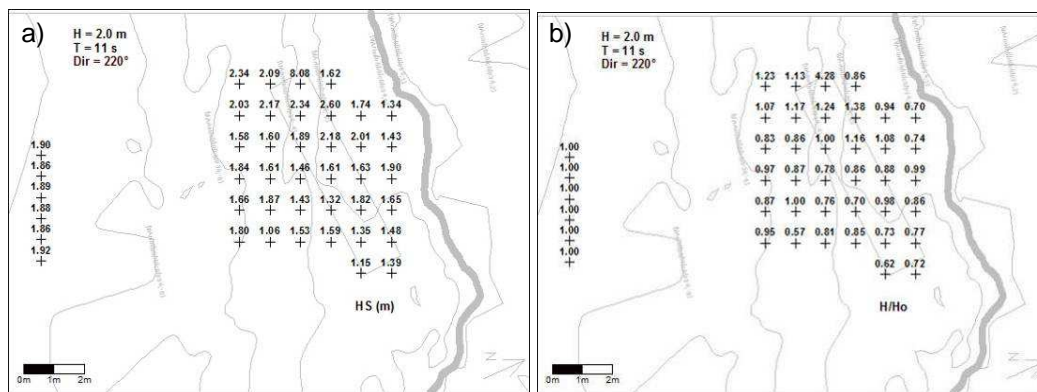


Figura 6 – Exemplo de resultados, nos pontos de medição: a) Altura de onda significativa; b) Índices de agitação (Fortes *et al.*, 2007b).

No presente trabalho, e no que diz respeito à agitação regular, apenas se coligiu a informação dos trabalhos anteriores (Fortes *et al.*, 2008, Leite, 2008 e Leite *et al.*, 2008) e se efectuaram figuras ao longo das secções transversais S4, S5 e S6, identificadas na Figura 7, dos

valores de altura de onda e dos índices de agitação. Este tipo de apresentação facilita a comparação com resultados numéricos e, por conseguinte, facilita a validação do modelo numérico. Neste caso obtiveram-se 9 figuras correspondentes aos três períodos de onda e três níveis de maré, para cada secção. Estes resultados constituíram a base para a avaliação do desempenho do modelo numérico.

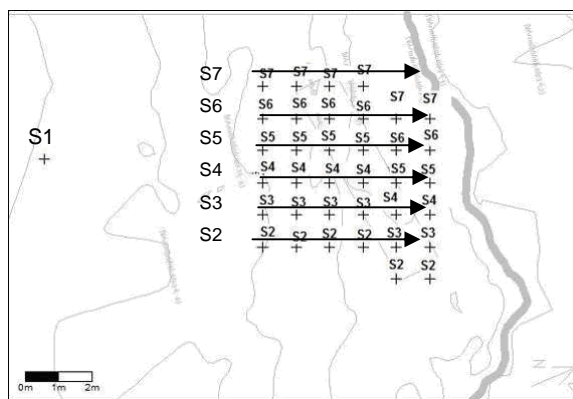


Figura 7 – Secções transversais S1 a S7.

Em relação aos resultados de elevação da superfície livre obtidos nos ensaios em modelo físico para a agitação irregular, foi necessário efectuar os cálculos de alturas de onda e índices de agitação em cada ponto de medição, para cada condição de agitação incidente. Foram efectuadas figuras com estes valores, quer no domínio espacial em estudo, quer ao longo das secções transversais S4, S5 e S6.

Nas secções seguintes apresentam-se estes resultados e efectua-se uma análise dos mesmos. A análise aqui efectuada apenas diz respeito à influência das condições de agitação incidente nos valores de altura de onda ao longo do recife, não se podendo inferir, como é óbvio, acerca do funcionamento do recife em relação ao surf. Para tal teria de se comparar com os resultados das linhas de rebentação e analisar as filmagens efectuadas. Tal sai do âmbito do presente trabalho.

5.3.1. Apresentação e análise dos resultados de ensaios com ondas regulares

Da Figura 8 à Figura 13, apresentam-se os resultados de índices de agitação para a secção transversal S5 (Figura 7), para ondas incidentes de períodos de 11, 15 e 19s, altura de onda entre 1 e 6m (caso não se verifique a rebentação antes do recife), direcção de 220° e 235°, e níveis de maré correspondentes a baixa-mar, nível médio e preia-mar. É apenas apresentada a secção transversal S5 por se tratar de um perfil central sobre o recife. Em Leite (2008) são apresentados os resultados para as ondas regulares de forma mais extensa.

Para baixa-mar, em geral:

- Ocorre um aumento do índice de agitação sobre o recife para qualquer período, altura e direcção de onda incidente. Em geral é maior para 220° do que para 235°, pois a direcção de

onda é mais perpendicular à batimetria. Como se efectuaram poucas medições, na maioria dos casos não se pode concluir se a onda rebenta;

- Dá-se um aumento do H/H_0 , com o aumento do período, pois as ondas de maior período começam a sentir os efeitos da batimetria mais cedo;

Para o nível médio, verifica-se que, em geral:

- Dá-se um aumento da altura da onda sobre o recife ou depois deste, com posterior diminuição para a maioria das alturas e direcções de onda testadas. Em geral, a posição de rebentação é posterior ao verificado em baixa-mar;
- Para $H_0=4m$, para $T=15s$ e $T=19s$, a rebentação ocorre antes do recife;
- Os índices aumentam de $T=11s$ para $T=15s$ para a maioria das alturas de onda, mas mantém-se da mesma ordem para $T=19s$;
- Não se verifica uma alteração significativa com a variação da direcção da onda incidente;

Para preia-mar:

- Dá-se um ligeiro aumento da altura da onda sobre o recife para $T=11s$ e $15s$ para a maioria das alturas de onda, e para H_0 mais elevado o empolamento é mais sentido;
- Com o aumento do período, os índices de agitação aumentam na generalidade, para $\theta=220^\circ$.
- Quando $\theta=235^\circ$, verifica-se um aumento dos índices de agitação de $T=11s$ (Figura 11c) para $T=15s$ (Figura 12c), mas deste último para $T=19s$ (Figura 13c) dá-se uma diminuição significativa.
- Com a variação de direcção de onda, observa-se uma grande diminuição do índice de agitação de $\theta=220^\circ$ para $\theta=235^\circ$, especialmente para $H_0=1m$, não parecendo isto dar-se por efeito do recife, mas sim devido à aproximação à costa.

Em termos gerais, as tendências são:

- Dá-se um aumento da altura de onda na zona do recife com posterior diminuição nos casos de nível médio e preia-mar. Para a situação de baixa-mar apenas é visível o empolamento não se podendo inferir sobre o local de rebentação devido à falta de dados nos pontos de medição sobre o recife. Esse comportamento é muito dependente das características da onda incidente;
- Com o aumento do nível de maré, os índices de agitação diminuem em geral;
- Com a direcção $\theta=220^\circ$ verificam-se índices de agitação geralmente mais elevados do que para $\theta=235^\circ$, mais precisamente para baixa-mar e preia-mar. Para o nível médio, a diferença não é notória;
- As ondas que parecem responder melhor à presença do recife, ou seja, que possivelmente apresentam rebentação sobre a estrutura, são as ondas $H_0=2m$ e $H_0=3m$, mas os resultados obtidos são bastante variáveis, exibindo um comportamento um tanto ou quanto aleatório.

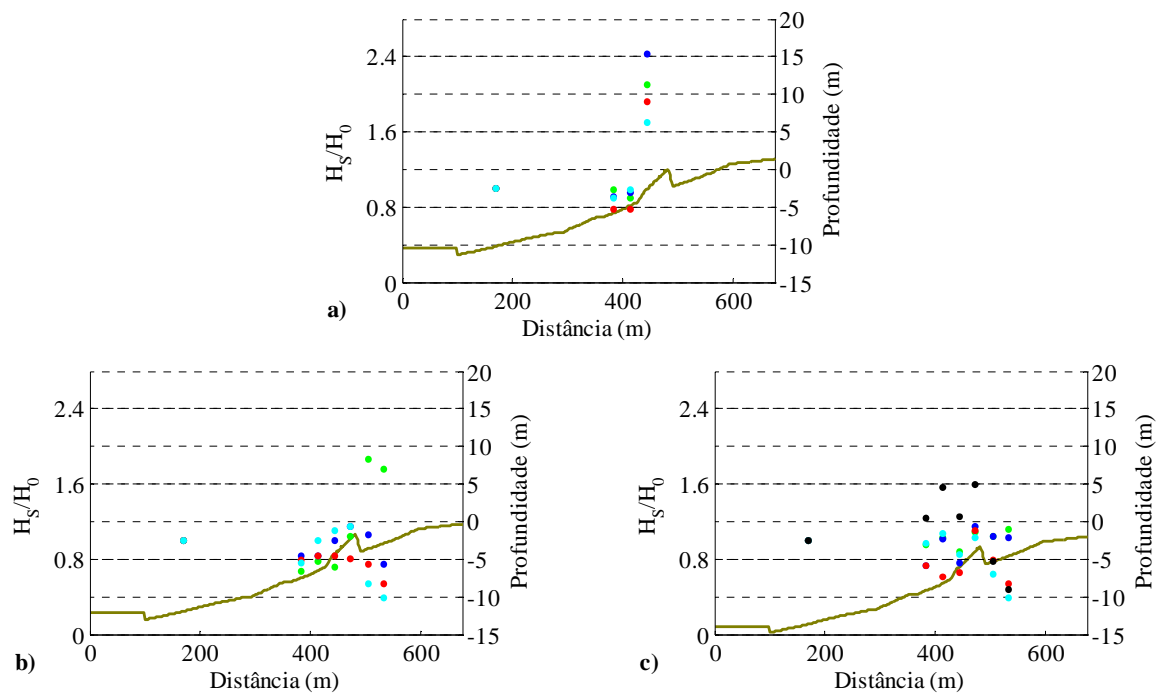


Figura 8 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=11s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

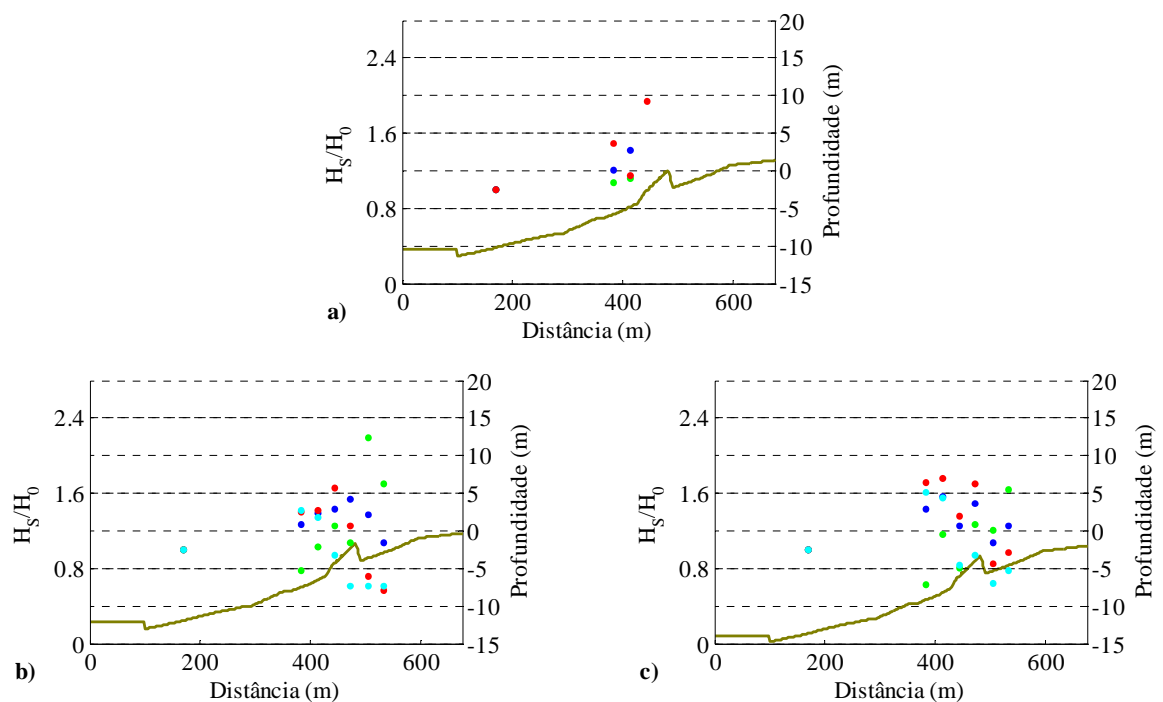


Figura 9 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=15s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

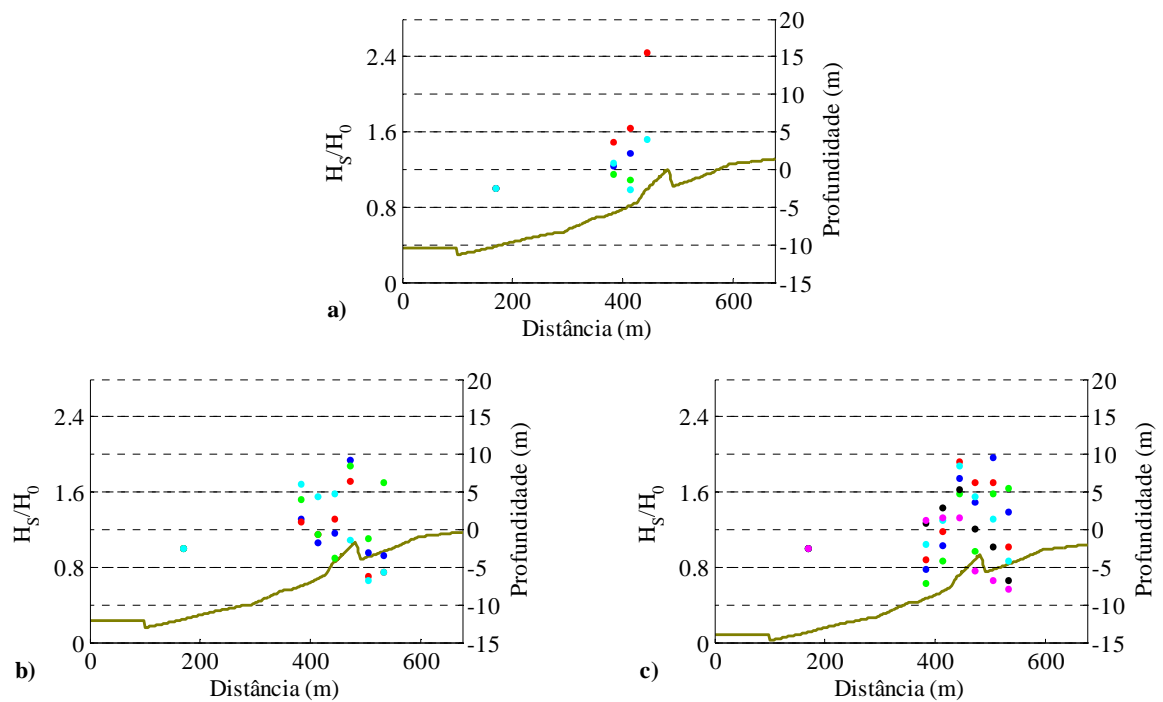


Figura 10 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=19s$, $\theta=220^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$; rosa – $H_0=6m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

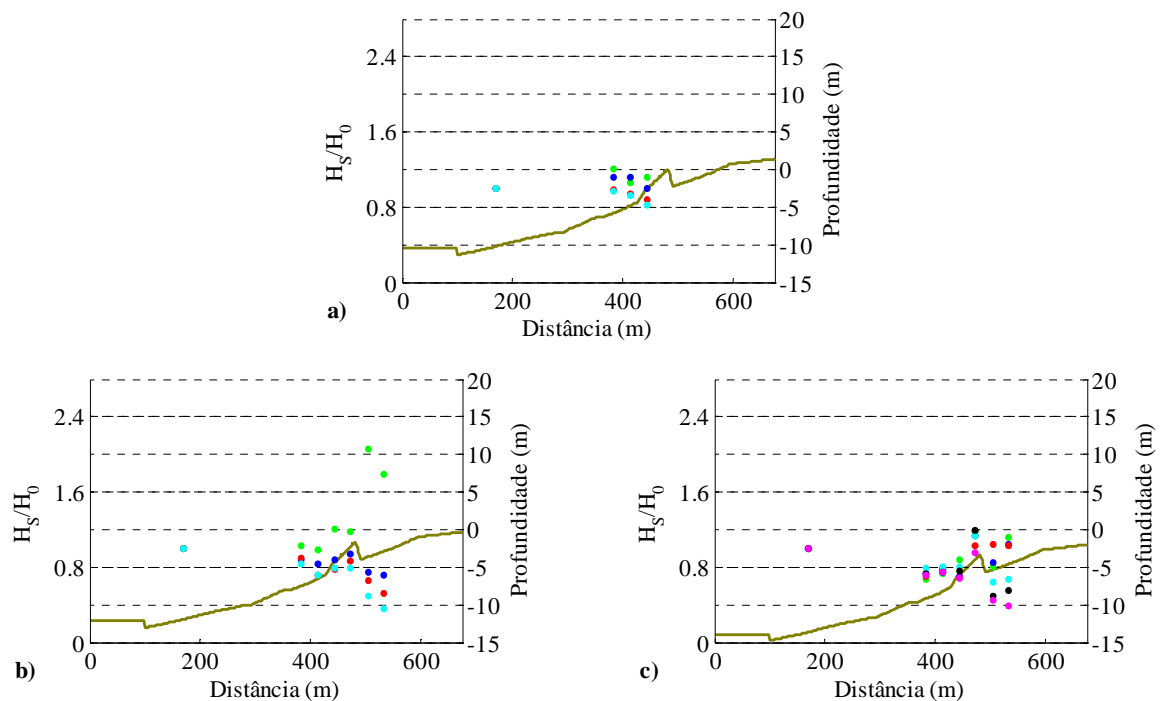


Figura 11 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=11s$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1m$; azul escuro – $H_0=2m$; vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$; preto – $H_0=5m$; rosa – $H_0=6m$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

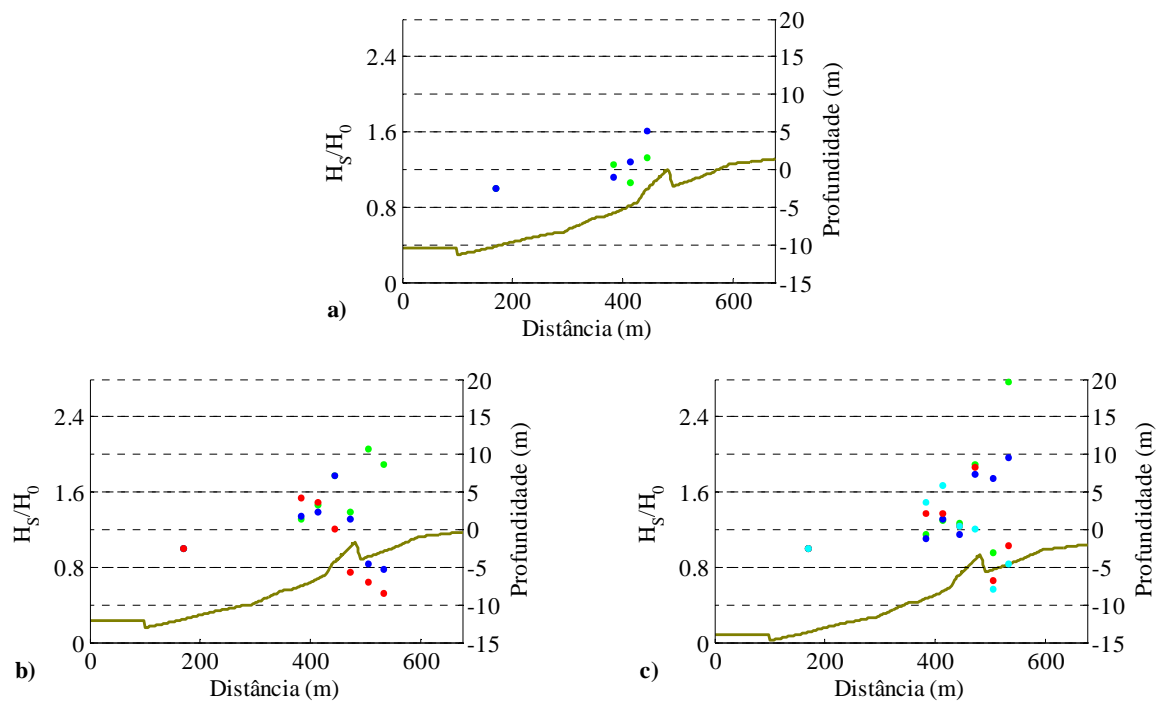


Figura 12 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=15\text{s}$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1\text{m}$; azul escuro – $H_0=2\text{m}$; vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

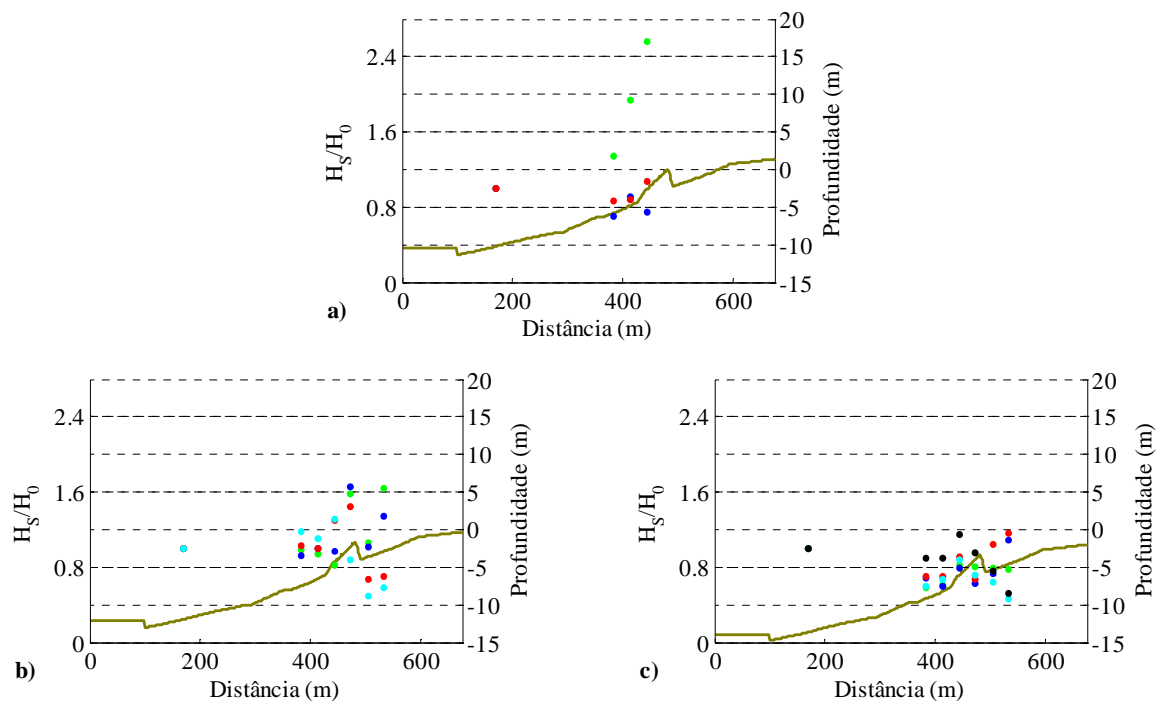


Figura 13 – Índices de agitação da secção transversal S5 obtidos com o ensaio físico. Ondas regulares, $T=19\text{s}$, $\theta=235^\circ$. a) Baixa mar; b) Nível médio; c) Preia-mar. Verde – $H_0=1\text{m}$; azul escuro – $H_0=2\text{m}$; vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$; preto – $H_0=5\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife.

5.3.2. Apresentação e análise dos resultados de ensaios com ondas irregulares

Da Figura 14 à Figura 21, são apresentados os resultados dos índices de agitação ao longo das secções transversais S4, S5 e S6, para ondas incidentes de períodos de pico de 11 e 15s, altura de onda significativa de 3 e 4m, direcção de pico de 220° e 235°. Os níveis de maré considerados foram o nível médio e de preia-mar. Não se considerou o nível de baixa-mar pelo facto de não existirem tantos dados para este caso. Com efeito, para a situação de baixa-mar, só foram obtidos resultados para três posições P1, P2 e P3, estando estas situações antes do recife, pois não havia água suficiente para efectuar medições sobre este.

No anexo I apresenta-se as respectivas alturas de onda para cada um dos casos de H_s/H_0 aqui apresentado, obtidos em cada ponto de medição nos ensaios experimentais com ondas irregulares incidentes.

Para nível médio:

- Com o aumento do período, observa-se na generalidade um aumento do empolamento, particularmente nas secções transversais S5 e S6, aumento este mais evidente para $\theta=220^\circ$ (Figura 14 e Figura 15) do que para $\theta=235^\circ$ (Figura 16 e Figura 17).
- Na generalidade, para $\theta=220^\circ$ obtêm-se valores de índice de agitação mais elevados do que para $\theta=235^\circ$, tanto para $T=11s$ como para $T=15s$.
- Não parece haver grande influência de H_0 no comportamento dos índices de agitação, já que $H_0=3m$ e $H_0=4m$, apresentam de modo geral, índices de agitação da mesma ordem.

Para preia-mar:

- Com o aumento do período não se verifica grande variação no índice de agitação obtido, quer para $\theta=220^\circ$, como para $\theta=235^\circ$. A onda não sente o recife.
- Com a variação da direcção da onda incidente, os resultados obtidos são muito semelhantes, para todos os casos apresentados, não se verificando portanto grande variação de uma direcção de onda para a outra.
- Ambas as alturas de onda testadas apresentam empolamento da mesma ordem de grandeza, não se verificando assim a influência de H_0 no seu comportamento.

Para o caso das ondas irregulares, em conclusão, há que salientar que para $\theta=220^\circ$ se verifica uma resposta mais evidente das ondas testadas à presença do recife, observando-se de uma maneira geral, um empolamento das ondas sobre este com posterior diminuição após este. Para o nível de preia-mar, não há grande variabilidade dos índices de agitação. O aumento do período da onda leva ao aumento do empolamento na zona do recife.

É importante ainda referir que face às ondas regulares, as ondas irregulares não apresentam tanta variabilidade.

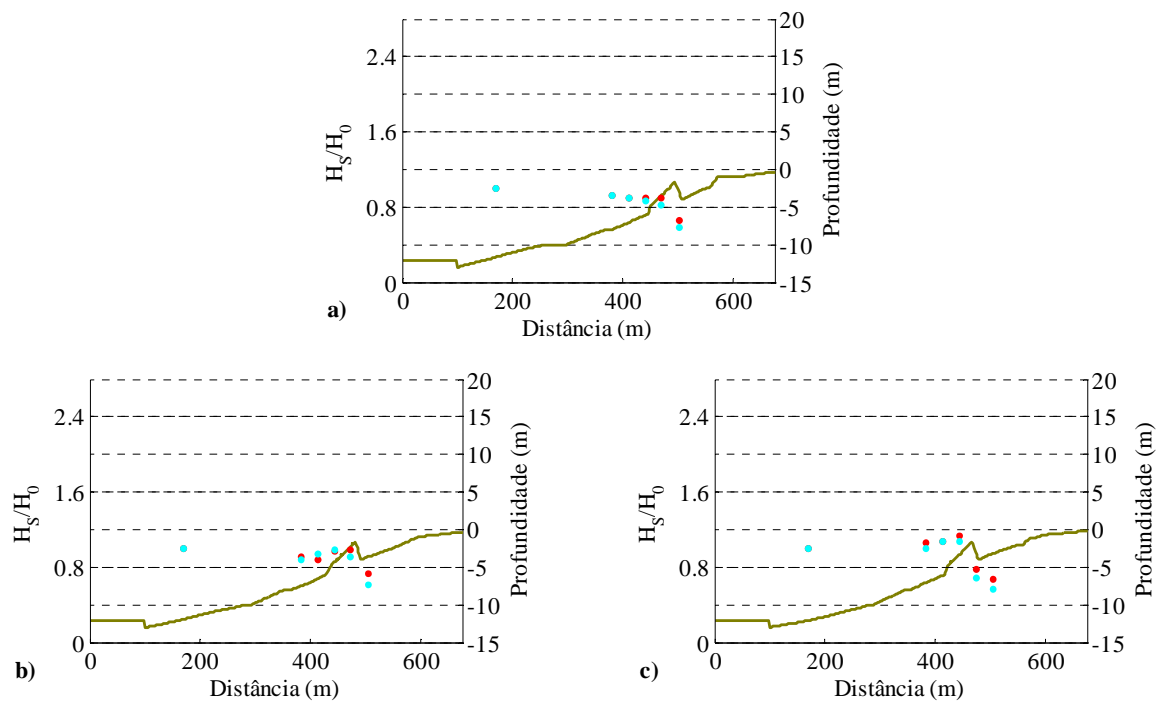


Figura 14 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11\text{s}$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

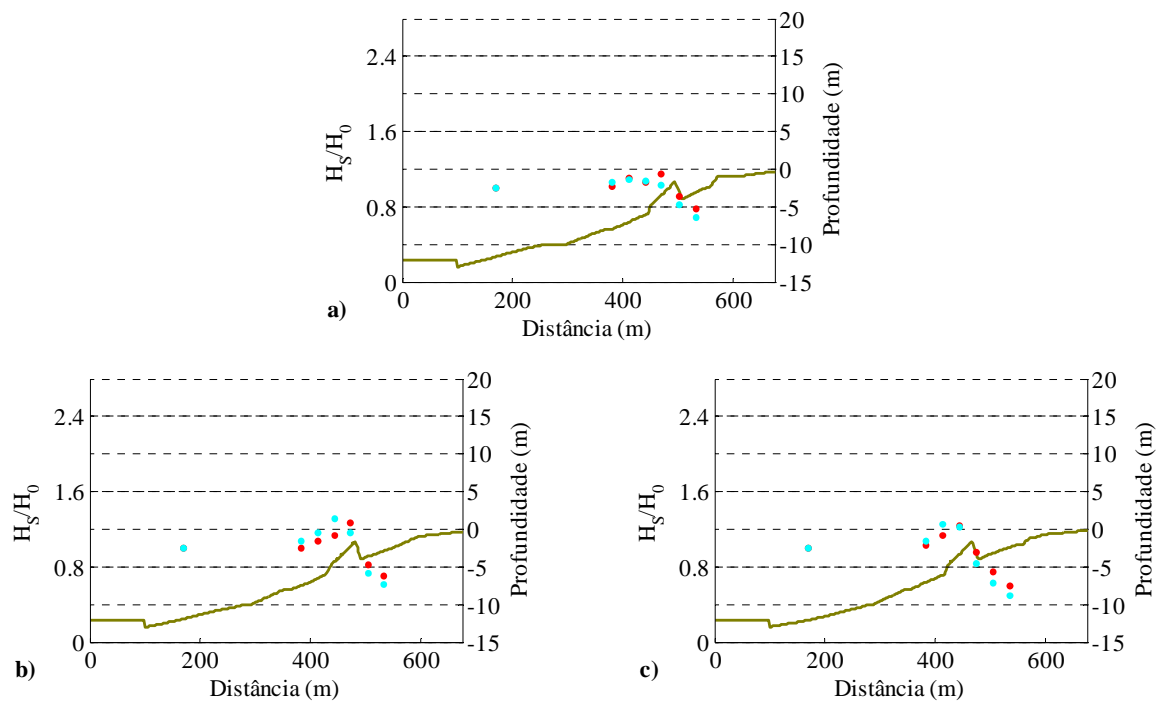


Figura 15 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15\text{s}$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

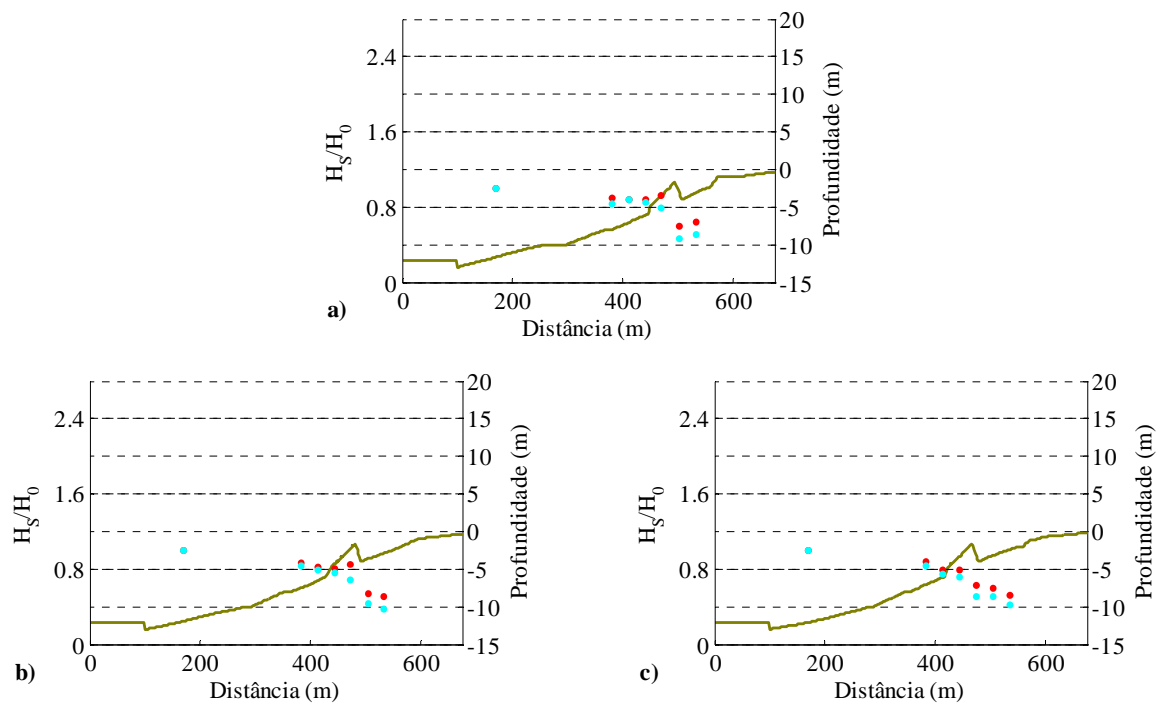


Figura 16 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11\text{s}$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

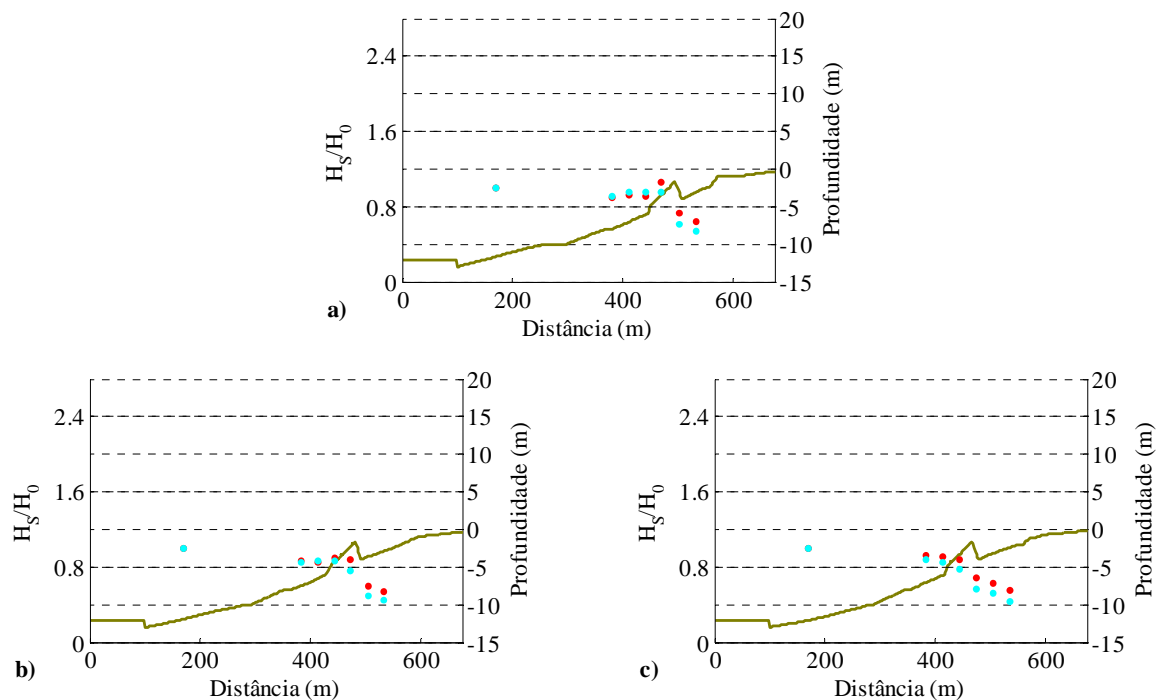


Figura 17 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15\text{s}$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3\text{m}$; azul claro – $H_0=4\text{m}$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

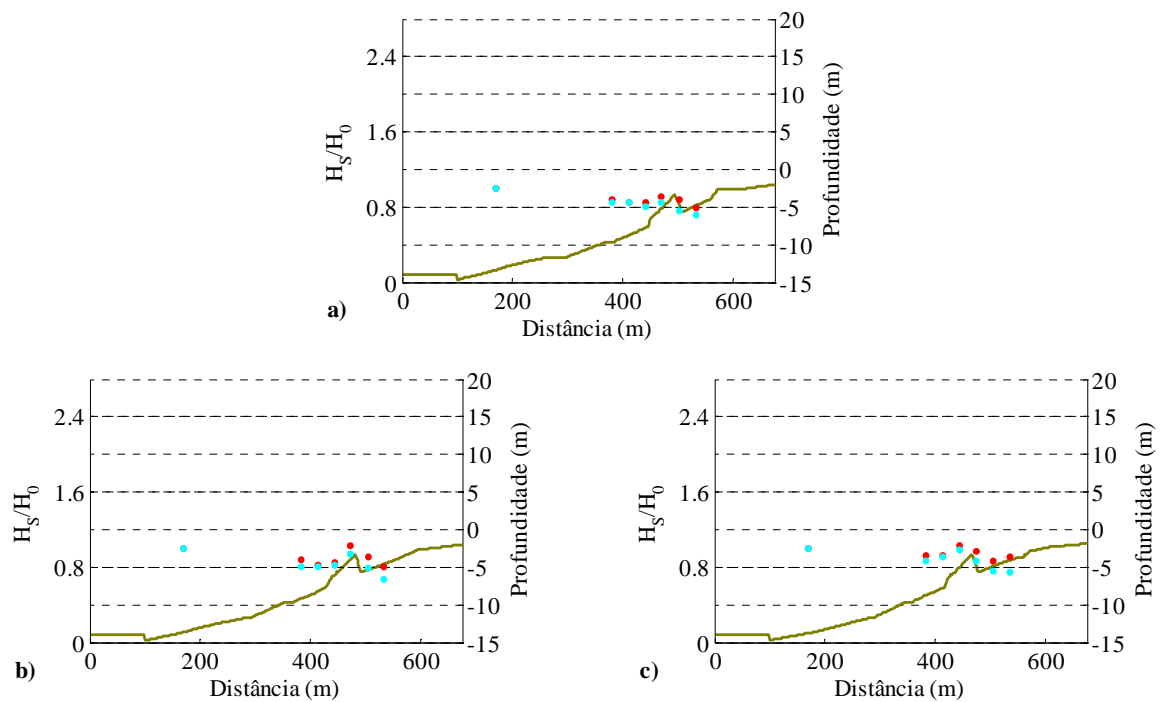


Figura 18– Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

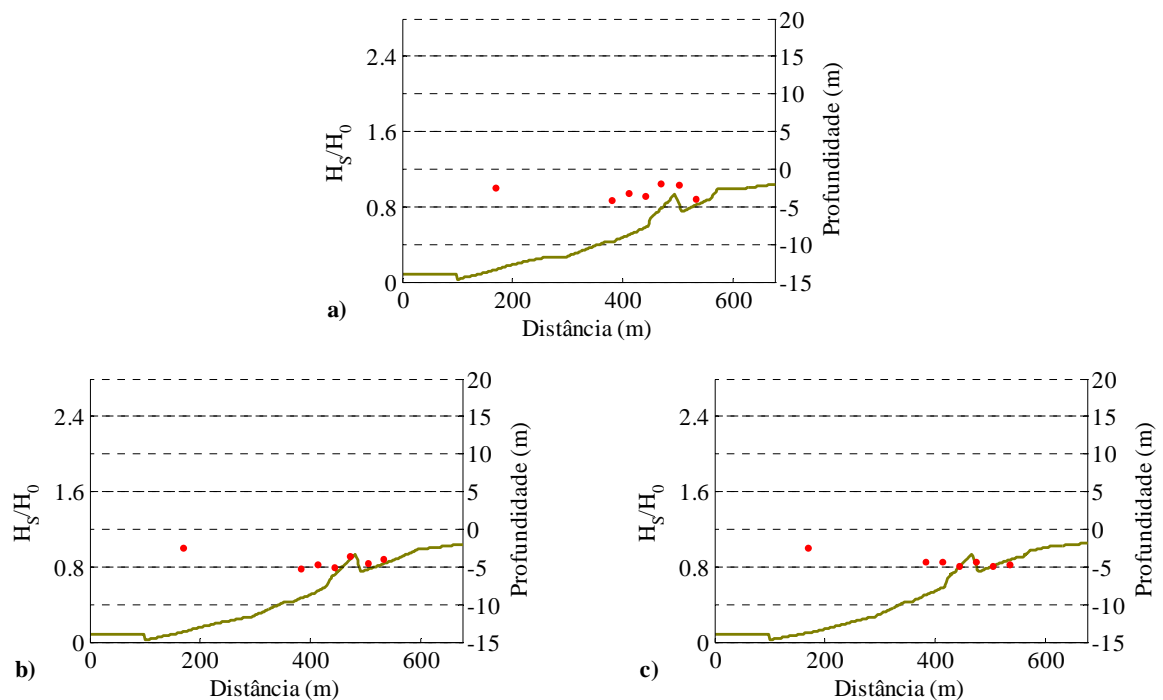


Figura 19 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

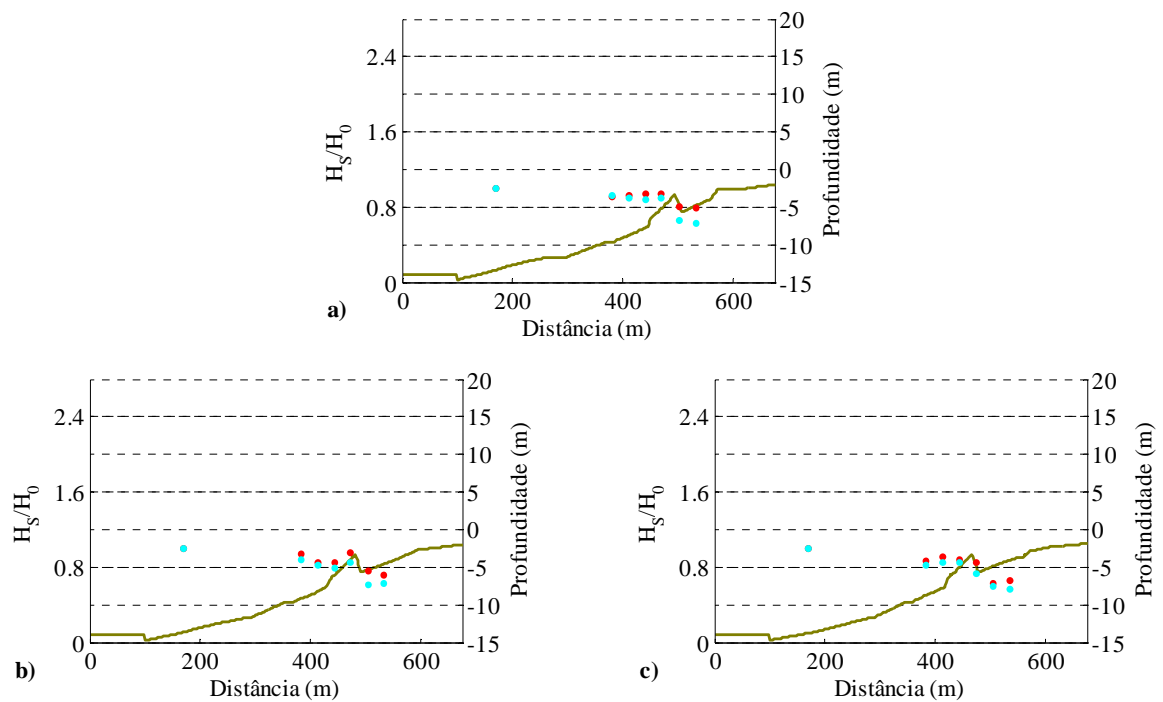


Figura 20 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

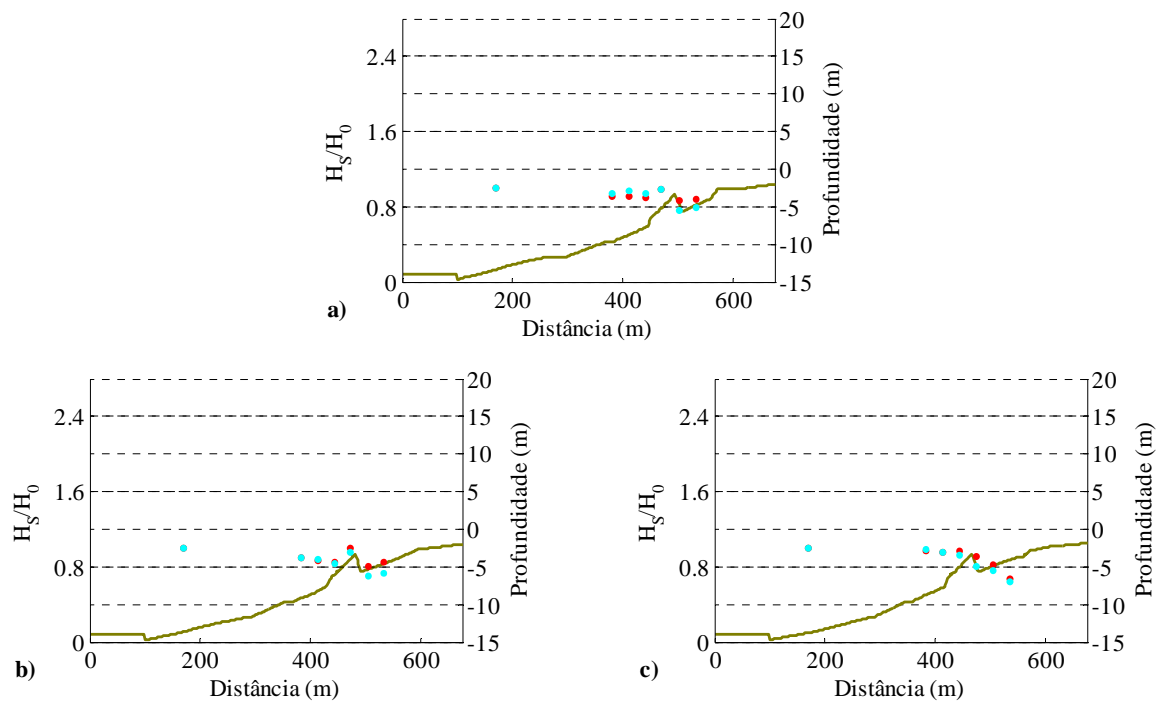


Figura 21 – Índices de agitação obtidos com o ensaio físico. Ondas irregulares, $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

6. Modelação numérica

6.1. Breve historial

Em Fortes *et al.* (2008), foi efectuado o estudo em modelo numérico do funcionamento de diversas soluções propostas para o recife artificial de surf. Este estudo, que incluiu várias soluções para a localização e geometria do recife, foi realizado através da utilização do modelo parabólico baseado na equação de *mild-slope*, REFDIF (Dalrymple e Kirby, 1991) que descreveu a propagação de ondas desde o ponto P4 até à costa, (ver Figura 1), e o programa MOREIAS, Mendes *et al.* (2007) para a análise dos parâmetros de surfabilidade e consequentemente, funcionamento do recife para o surf.

No entanto, a utilização do modelo REFDIF (Dalrymple e Kirby, 1991), apresenta limitações: trata-se de um modelo linear e baseado na aproximação parabólica da equação de declive suave. Para contornar este problema, pode-se recorrer a modelos baseados nas equações estendidas de Boussinesq que permitem uma descrição mais precisa da evolução da propagação das ondas em zonas de profundidade variável e que têm em conta os efeitos da refacção, difracção e efeitos não lineares.

Um exemplo deste tipo de modelos, o modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), permite reproduzir a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes: dispersão de frequência, dispersão de amplitude, empolamento (linear e não-linear), difracção, refacção pelo fundo e devida às correntes, geração de harmónicas e dissipação de energia por rebentação da onda.

Neste sentido, julgou-se interessante avaliar o desempenho do modelo COULWAVE (mais sofisticado que o REFDIF) na simulação da hidrodinâmica em torno do recife artificial em São Pedro do Estoril, utilizando, para tal análise, os resultados experimentais obtidos em modelo físico.

Assim, nas próximas secções descreve-se sucintamente o modelo COULWAVE e a metodologia adoptada neste trabalho. Seguidamente, são descritas as condições de cálculo do modelo numérico e os testes de sensibilidade efectuados. Efectua-se uma comparação dos resultados numéricos e experimentais em termos dos valores de elevação da superfície livre e dos índices de agitação. Finalmente, são analisados os parâmetros de surfabilidade (ângulo de rebentação e número de Iribarren) obtidos com os resultados numéricos.

6.2. Descrição do modelo numérico

O modelo numérico utilizado neste estudo foi o COULWAVE, versão 2005 de Lynett & Liu, e trata-se de um modelo de diferenças finitas baseado nas equações não lineares de Boussinesq, deduzidas por Wei *et al.* (1995), que apresenta uma precisão de Δt^4 no tempo e Δx^4 no espaço (Lynett e Liu, 2004). O nome COULWAVE advém de Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.

O facto de ser um modelo baseado nas equações estendidas de Boussinesq, permite uma descrição mais precisa da evolução das ondas em zonas de profundidade variável, onde a propagação destas é afectada pelos efeitos da refacção, difracção e efeitos não lineares.

Segundo os autores, as equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações da continuidade e do movimento, utilizando um conceito de multi-camadas (*multi-layers*) que consiste na divisão da coluna de água por camadas, adoptando-se um determinado perfil vertical de velocidades para cada camada. A precisão do modelo vai depender assim do número de camadas escolhido, o que permite a sua utilização em águas muito profundas (Lynett *et al.*, 2002) continuando a apresentar características lineares até $kh \sim 8$ e um comportamento linear de 2ª ordem até $kh \sim 6$, onde k é o número de onda, definido por $1/\lambda$.

Para cada camada, as equações da conservação da massa (3) e da quantidade de movimento (4) são dadas por:

$$\frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(\varepsilon_o \zeta + h) u_1] - \mu_o^2 \nabla \cdot \left\{ \left[\frac{\varepsilon_o^3 \zeta^3 + h^3}{6} - \frac{(\varepsilon_o \zeta + h) k_1^2}{2} \right] \nabla (\nabla \cdot u_1) + \left[\frac{\varepsilon_o^2 \zeta^2 + h^2}{2} - (\varepsilon_o \zeta + h) k_1 \right] \nabla \left(\nabla \cdot (hu_1) + \frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right\} = O(\mu_o^4) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \varepsilon_o u_1 \cdot \nabla u_1 + \nabla \zeta + \mu_o^2 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{k_1^2}{2} \nabla (\nabla \cdot u_1) + k_1 \nabla T_1 \right\} + \varepsilon \mu_o^2 \left[\begin{aligned} & (u_1 \cdot \nabla k_1) \nabla T_1 + k_1 \nabla (u_1 \cdot \nabla T_1) + k_1 (u_1 \cdot \nabla k_1) \nabla (\nabla \cdot u_1) \\ & + \frac{k_1^2}{2} \nabla (u_1 \cdot \nabla (\nabla \cdot u_1)) \end{aligned} \right] + \varepsilon \mu_o^2 \left[T_1 \nabla T_1 - \nabla \left(\zeta \frac{\partial T_1}{\partial t} \right) \right] + \varepsilon^2 \mu_o^2 \nabla \left(\zeta S_1 T_1 - \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial (\nabla \cdot u_1)}{\partial t} - \zeta u_1 \cdot \nabla T_1 \right) + \varepsilon^2 \mu_o^2 \nabla \left[\frac{\zeta^2}{2} ((\nabla \cdot u_1)^2 - u_1 \cdot \nabla (\nabla \cdot u_1)) \right] = O(\mu_o^4) \quad (4)$$

com

$$T_1 = \nabla \cdot (hu_1) + \frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial h}{\partial t} \quad ; \quad k_1 = \alpha_1 h + \beta_1 \zeta \quad ; \quad \varepsilon_o = \frac{a_o}{h_o} \quad ; \quad \mu_o = \frac{h_o}{l_o}$$

onde ζ é a elevação da superfície livre, h é a profundidade, u_1 é o vector de velocidade horizontal à profundidade definida em cada camada, g é a aceleração gravítica, ε é o parâmetro de não-linearidade, μ é o parâmetro da frequência de dispersão e S é um factor de forma. Os coeficientes α_1 e β_1 são parâmetros, já definidos por defeito no código do modelo, a_o é a amplitude da onda, h_o a profundidade e l_o comprimento de onda. O perfil vertical da velocidade horizontal é dado por:

$$U_1 = u_1 - \mu_o^2 \left\{ \frac{z_1^2 - k_1^2}{2} \nabla (\nabla \cdot u_1) + (z_1 - k_1) \nabla T_1 \right\} + O(\mu_o^4) \quad \text{com} \quad z_1 = -0.531h \quad (5)$$

sendo z_1 escolhido de modo a que as características resultantes do modelo de Boussinesq estejam de acordo com a teoria linear.

Lynett e Liu (2004) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade dependentes do tempo para ter em consideração as variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei *et al.* (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas utilizado consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efectuadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 no tempo de Δx^4 no espaço.

Neste trabalho, apenas os termos relacionado com a rebentação e com o atrito de fundo são descritos.

Apenas duas formas de dissipação de energia são consideradas no modelo numérico para uma camada e a equação do momento é alterada da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \dots + R_f + R_b = 0 \quad (6)$$

6.2.1. Modelo do atrito de fundo

O atrito de fundo é descrito na sua forma quadrática como:

$$R_f = \frac{f}{H} u_b |u_b| \quad (7)$$

onde $H=h+\zeta$, representando a coluna de água total, f é o coeficiente de atrito de fundo que, de acordo com os autores do modelo, assume tipicamente valores entre 0.001 e 0.01, e u_b é a velocidade horizontal junto ao fundo. Este parâmetro está dependente do número de Reynolds e das condições de fundo.

6.2.2. Modelo de rebentação

A implementação da rebentação da onda no modelo COULWAVE é baseada em Kennedy *et al.* (2000) e Chen *et al.* (2000), sendo esta calculada através da introdução dos termos de viscosidade turbulenta nas equações da conservação da quantidade do movimento, (Zelt, 1991):

$$R_{bx} = \frac{1}{h + \zeta} \left[\left(\nu \left((h + \zeta) u_1 \right)_x \right)_x + \frac{1}{2} \left(\nu \left(\left((h + \zeta) u_1 \right)_y + \left((h + \zeta) v_1 \right)_x \right) \right)_y \right] \quad (8)$$

$$R_{by} = \frac{1}{h + \zeta} \left[\frac{1}{2} \left(\nu \left(\left((h + \zeta) v_1 \right)_x + \left((h + \zeta) u_1 \right)_y \right) \right)_x + \left(\nu \left((h + \zeta) v_1 \right)_y \right)_y \right] \quad (9)$$

sendo R_{bx} e R_{by} as componentes em x e y do termo R_b . Os índices x e y representam derivadas espaciais e ν é o coeficiente de viscosidade turbulenta, localizado na face frontal da onda. Este coeficiente é definido por:

$$\nu = B(h + \zeta) \zeta_i \quad (10)$$

A quantidade B controla a ocorrência de dissipação de energia e garante uma transição suave entre a rebentação e a zona de não rebentação, é dada por:

$$B = \begin{cases} \delta & \zeta_t \geq 2\zeta_t^b \\ \delta(\zeta_t/\zeta_t^b - 1), & \zeta_t^b \leq \zeta_t \leq 2\zeta_t^b \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^b \end{cases} \quad (11)$$

onde δ é um factor amplificador e o parâmetro ζ_t^b determina o início e fim da rebentação da onda. ζ_t^b é determinado do seguinte modo:

$$\zeta_t^b = \begin{cases} \zeta_t^{(F)} & t - t_0 \geq T^b \\ \zeta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^b} (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 \leq T^b \end{cases} \quad (12)$$

em que $\zeta_t^{(I)}$ define o início da rebentação, i.e., é o patamar inicial da elevação da superfície livre que tem de ser excedido para a rebentação acontecer, $\zeta_t^{(F)}$ define o fim de rebentação, i.e., é o mínimo valor da elevação da superfície livre para acontecer para a rebentação continuar, t é o instante local, t_0 é o instante de tempo em que a rebentação da onda ocorre, $t - t_0$ é a idade do evento de rebentação e T^b é o tempo de transição, ou, o instante em que se considera que a rebentação cessa. O início e fim da rebentação da onda são determinados utilizando os parâmetros $\zeta_t^{(I)}$ e $\zeta_t^{(F)}$ e o tempo de transição T^b .

Até este ponto o modelo é idêntico ao modelo de Kennedy *et al.* (2000). A diferença entre a formulação da rebentação de Kennedy (2000) e a utilizada por Lynett e Liu (2004) reside na definição dos parâmetros livres, que para estes últimos autores, $\zeta_t^{(I)}$ e $\zeta_t^{(F)}$ são dados por $0.65\sqrt{gH}$ e $0.08\sqrt{gH}$, respectivamente. O valor de T^b é dado por $8\sqrt{H/g}$ e $\delta=6.5$.

Estes parâmetros foram definidos com base em testes sobre fundos de inclinação suave. Noutras situações cujos perfis se afastem desta situação ideal, haverá que proceder ao ajuste do valor destes parâmetros. É, pois este facto que justifica o presente trabalho.

6.2.3. Ficheiros de entrada e de saída

Através do conjunto de exemplos que vem em anexo com o modelo COULWAVE, foi possível identificar que tipo de ficheiros deveriam ser dados como entrada no modelo, e como estes deveriam ser estruturados.

Nesta secção, descrevem-se os ficheiros necessários para efectuar uma simulação com este modelo, bem como os resultados que se obtêm com cada corrida.

O modelo COULWAVE requer os seguintes ficheiros de dados:

- um ficheiro *f_topo.dat*, que contém os valores da profundidade em cada ponto da malha, identificados pelas coordenadas x e y. Este ficheiro está organizado numa única coluna em que o y é mantido constante até estarem registados todos os valores de x e só aí se passa para os valores associados ao y seguinte e assim sucessivamente;

- um ficheiro *x_topo.dat* e um *y_topo.dat* que contém as dimensões em x e y respectivamente com o espaçamento pretendido (no presente caso 2 metros);
- um ficheiro designado por *size_topo.dat* que é constituído por um vector coluna de dois valores, o primeiro sendo a dimensão do vector *x_topo* e o segundo a dimensão do vector *y_topo*. Estes dois últimos valores, quando multiplicados têm de corresponder à dimensão de *f_topo*;
- um ficheiro *sim_set.dat* que contém todos os parâmetros necessários à execução do modelo. Este *sim_set.dat* pode ser criado pelo COULWAVE através de uma interface. Uma vez construído, é sempre possível refazer ou recomeçar cada simulação que por qualquer motivo não tenha terminado, sem que seja necessário voltar a definir os parâmetros pretendidos.

Após realizada uma simulação, são obtidos resultados em termos de séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos para todo o domínio de cálculo. No presente trabalho, os ficheiros utilizados para tratamento dos resultados obtidos, foram

- *zeta1.dat* que contém os valores de elevação da superfície livre para todo o domínio;
- *ts_grp*.dat* que são os ficheiros das séries temporais de elevação da superfície livre. * representa o respectivo número associado ao ponto da malha pretendido;
- *bl_visc1.dat*, ficheiro constituído por três matrizes com resultados correspondentes a: zonas de rebentação; coeficientes de viscosidade turbulenta associados às zonas de rebentação; e a matriz profundidade re-arranjada pelo próprio modelo, pois a matriz de profundidades dada pelo utilizador vai sofrer ligeiras alterações de modo a incluir as zonas de absorção de energia junto às fronteiras abertas, que o utilizador definiu no início da simulação.

Quanto aos outros ficheiros existentes, podem ser consultados no manual do programa.

6.3. Metodologia adoptada

Antes da aplicação do modelo COULWAVE ao caso em estudo, realizaram-se um conjunto de simulações com os exemplos propostos no manual do modelo (Lynett e Liu, 2005), de modo a conhecer o tipo e formato dos ficheiros de entrada e saída do modelo.

Seguidamente, para a zona em estudo foi efectuado um conjunto de testes preliminares no sentido de avaliar a resposta do modelo:

- a. às características da onda incidente;
- b. à localização das fronteiras de absorção no domínio computacional e da zona de geração da onda;
- c. aos valores do número de Courant e do número de pontos por comprimento de onda;
- d. aos parâmetros intrínsecos ao modelo relacionados com a rebentação e atrito de fundo.

Note-se que primeiramente, alguns destes testes foram efectuados utilizando a versão 2008 do modelo. No entanto, comparações com os resultados experimentais mostraram que esta versão, por estar ainda em desenvolvimento, conduzia a resultados claramente erróneos. Como se pode observar na Figura 22, verificou-se que esta versão do modelo não respondia à variação

da batimetria da forma esperada, obtendo-se resultados bastante suavizados. Apesar de ambas as versões apresentarem um comportamento semelhante entre si, com a versão 2005 (também na Figura 22) obtiveram-se valores de altura de onda mais próximos aos do modelo físico do que com a versão de 2008. Foi assim decidido utilizar a versão de 2005, versão esta que tem sido utilizada correntemente no LNEC.

No caso dos testes de sensibilidade, por questões relacionadas com a elevada duração temporal de cada simulação, foram efectuadas simulações de apenas 200s, pois com o aumento do tempo de simulação pretendido, verificou-se um aumento extremamente elevado do tempo de corrida para cada caso.

Uma vez estabelecidas as condições (correspondentes às ensaiadas em modelo físico) de aplicação do modelo, realizaram-se as simulações numéricas para condições de agitação regular que correspondiam às melhores condições para o surf verificadas em modelo físico, considerando tempos de simulação de 600 s. Essas condições correspondem a $T=11s$, $H=2, 3$ e $4m$; $T=15s$, $H=2m$ e $T=19s$, $H=2, 3$ e $4m$, para nível o médio de maré e $\theta=220^\circ$.

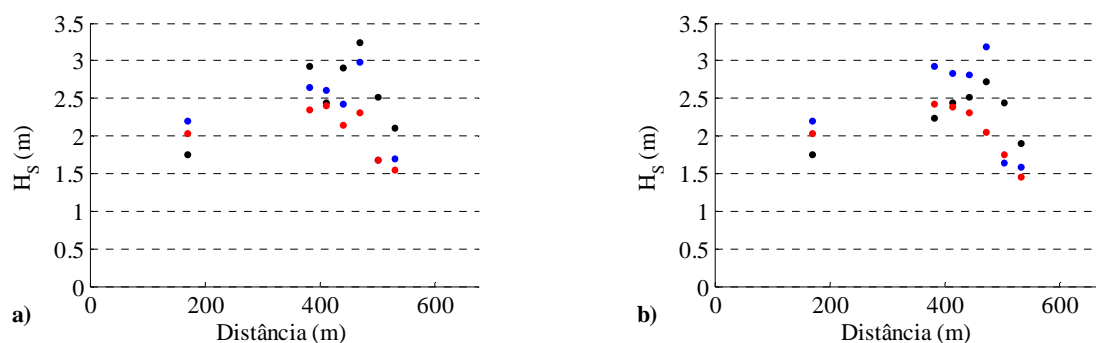


Figura 22 – Comparação das versões 2005 (azul) e 2008 (vermelho) do modelo COULWAVE relativamente aos resultados do modelo físico (preto). $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré. a) secção 4; b) secção 5.

Após a obtenção dos valores de elevação da superfície livre em todo o domínio computacional, utilizou-se um programa REGISTOS_SURF (Fortes *et al.*, 2009) para calcular os respectivos valores de altura de onda em cada ponto da malha, mas para uma área menor, sobre o recife, representativa da malha utilizada nos ensaios em modelo físico, (ver Figura 5).

Foi efectuada depois uma análise comparativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais em termos de elevação da superfície livre e alturas de onda, ao longo de secções transversais S4 a S6, Figura 7.

Finalmente, com base nos resultados numéricos (alturas de onda, direcção de onda e zonas de rebentação) para condições de agitação correspondentes a todos os períodos de onda em estudo e $H_0=2m$, foram determinados os parâmetros de surfabilidade, nomeadamente o número de Iribarren e o ângulo de rebentação para análise do funcionamento do recife. Para tal utilizaram-se um programa de representação visual dos resultados obtidos com o modelo, criado para este mesmo efeito, em MATLAB®, o PLOT_ALTURAS.m (Mendonça e Proença, 2009).

6.4. Condições de cálculo

A aplicação do modelo COULWAVE ao caso em estudo iniciou-se pela definição do domínio de cálculo que corresponde às dimensões ensaiadas em modelo físico. Foi, no entanto, necessário acrescentar uma zona de profundidade constante para a geração de ondas, requisito fundamental ao bom funcionamento do modelo. Na Figura 23 representa-se o domínio de cálculo considerado, que tem uma extensão de 674 metros segundo a direcção x e de 744 metros segundo a direcção y.

A malha de pontos que inclui a informação da batimetria do local de estudo foi construída considerando um espaçamento idêntico em ambas as direcções, $\Delta x = \Delta y = 2.0\text{m}$ o que se traduz em 338 e 373 pontos, respectivamente, para cada eixo.

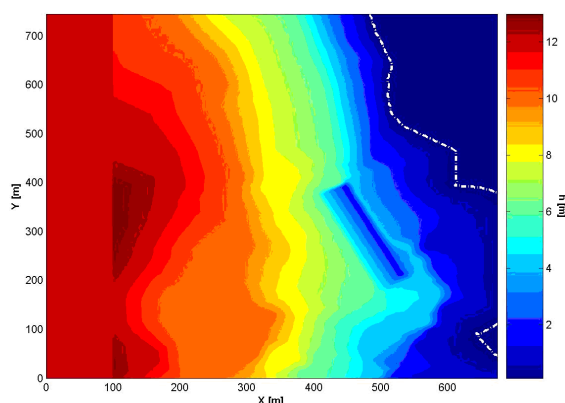


Figura 23 - Domínio computacional considerado ilustrando os contornos batimétricos e as fronteiras.

A grelha da batimetria foi construída de forma a estar alinhada com a direcção de onda incidente de 220° e, assim, simplificar a introdução do ângulo correspondente à direcção de propagação da onda no modelo. Assim, nas corridas correspondentes à direcção de onda de 220° , o ângulo introduzido é de 0° e para o caso da direcção de 235° o ângulo correspondente é de 15° .

Quanto às condições de fronteira, admitiram-se fronteiras absorventes à esquerda ($x=0$) e à direita (zona da costa) no domínio, para absorção das ondas que se propagam desde o interior do domínio para o exterior a fim de evitar reflexão destas, o que poderia interferir com o estudo pretendido. A dimensão destas fronteiras foi de meio comprimento de onda, sendo 56, 79 e 101m para $T=11\text{s}$, $T=15\text{s}$ e $T=19\text{s}$, respectivamente.

A fonte de geração das ondas foi posicionada na zona de profundidade constante. A sua localização foi alvo de testes preliminares de modo a estabelecer o melhor local para esta, chegando-se à conclusão que devia ser $x=88\text{m}$, muito próximo do ponto onde se inicia a batimetria real.

6.5. Testes de sensibilidade

Foram efectuados diversos testes de sensibilidade para determinar quais os parâmetros mais adequados a utilizar no caso em estudo.

Nesta secção, apresenta-se apenas os testes relacionados com os parâmetros de rebentação e atrito de fundo pois estes são os que mais influenciam os resultados numéricos.

6.5.1. Análise de sensibilidade ao parâmetro de rebentação

De acordo com o manual do modelo (Lynett e Liu, 2005), o valor recomendado para o parâmetro de rebentação, ζ , é de 0.65. Porém, Kirby *et al.* (1998) afirmam que o valor mais indicado para este parâmetro em estudos de praias com perfil barra/fossa é de 0.35, pelo que ambos os valores foram testados, sendo os resultados apresentados na Figura 24.

Para qualquer que seja o valor de $\zeta_t^{(I)}$, verifica-se que os resultados obtidos do índice de agitação são muito próximos, respondendo ambos de forma positiva à presença do recife. Em geral, constata-se que os resultados numéricos têm um andamento semelhante ao experimental, mas são sempre inferiores neste caso, principalmente na zona após a rebentação. Para $\zeta_t^{(I)}=0.35$ os valores do índice são ligeiramente mais elevados, e portanto mais próximos do modelo físico, pelo que se optou por utilizar este valor.

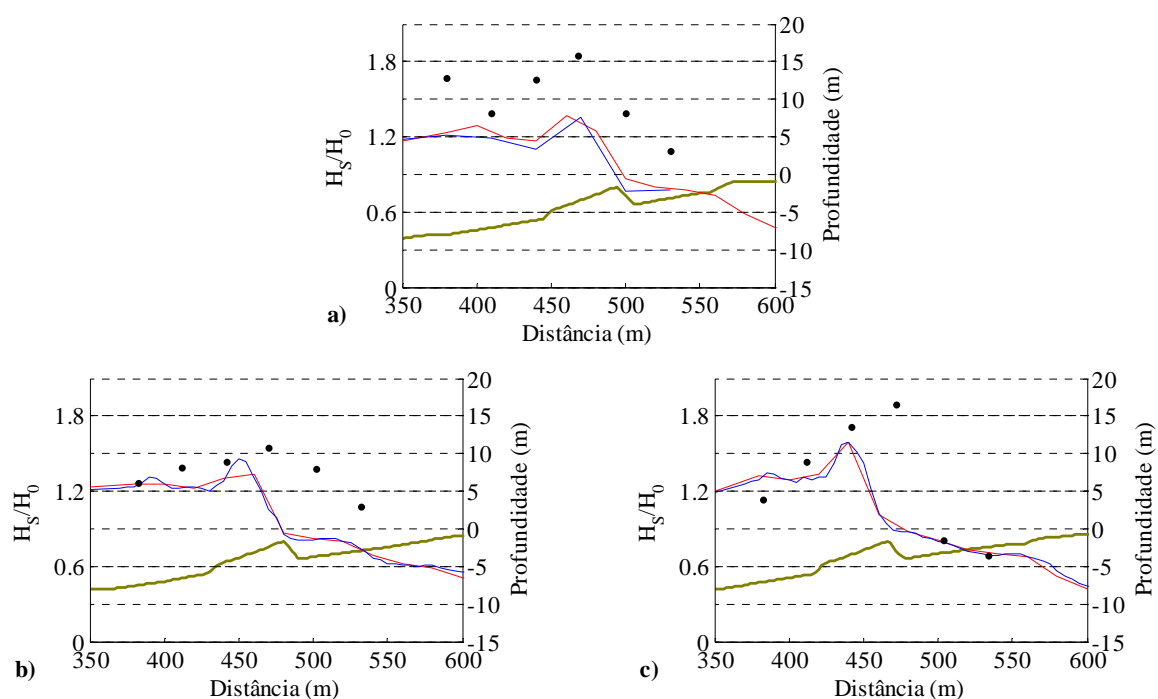


Figura 24 – Comparação dos valores do índice de agitação obtidos para $\zeta_t^{(I)}=0.65$ (azul) e $\zeta_t^{(I)}=0.35$ (vermelho), para as secções a) S4; b) S5; c) S6. $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas; os pontos pretos representam o modelo físico.

Para os restantes períodos também se constatou que os resultados numéricos não apresentavam diferenças significativas entre $\zeta_t^{(I)}=0.65$ e $\zeta_t^{(I)}=0.35$, mas era este último que conduzia a resultados mais próximos dos experimentais na generalidade.

O modelo apresenta algumas limitações na simulação da rebentação da onda, estando esta fortemente dependente dos parâmetros intrínsecos ao modelo que foram aqui calibrados. De futuro, será necessário efectuar uma análise de sensibilidade mais detalhada com outros valores de $\zeta_i^{(I)}$ e para os parâmetros $\zeta_i^{(F)}$, T^b e δ , para avaliar a sua influência nos resultados do modelo de forma mais precisa.

6.5.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro do atrito de fundo

Relativamente ao parâmetro do atrito de fundo, f , de acordo com o manual, este deve ter um valor compreendido entre 0.001 e 0.01, sendo o valor recomendado $f=0.001$. Optou-se então por testar os valores $f=0.001$, $f=0.005$ e $f=0.01$. Os resultados são apresentados na Figura 25.

Verifica-se que entre os valores de H_S correspondentes ao limite inferior e superior do intervalo de f considerado, apresentam uma grande diferença, estando $f=0.001$ muito mais próximo dos valores obtidos com o modelo físico. Entre os valores $f=0.001$ e $f=0.005$ a diferença no resultado é muito reduzida, pelo que se optou o valor proposto pelo autor.

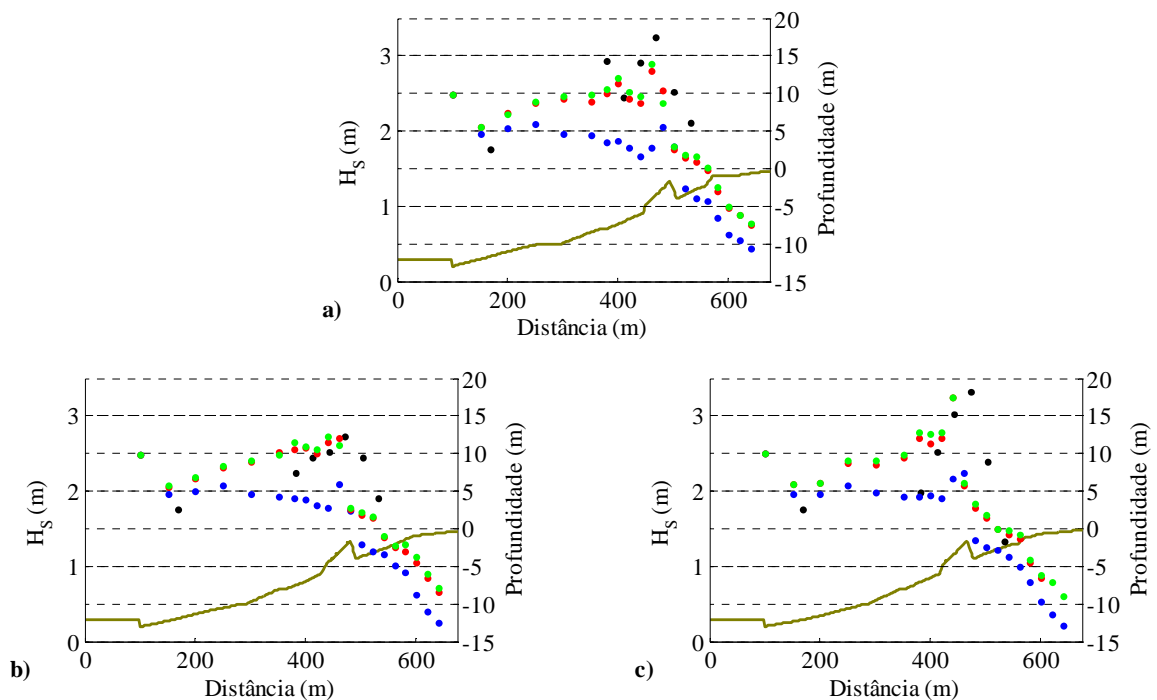


Figura 25 – Comparação dos valores $f=0.01$ (azul), $f=0.005$ (verde) e $f=0.001$ (vermelho) para o parâmetro do atrito de fundo para as secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. $T=15s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas; os pontos pretos representam o modelo físico.

6.6. Comparação com resultados experimentais

Após estabelecidas as condições de cálculo do modelo e os valores para os parâmetros empíricos do modelo, foram efectuadas simulações para ondas regulares de período 11, 15 e 19 s, alturas de 2 e 3 m, direcção de 220° e considerando o nível médio de maré. Note-se que estas

foram condições para as quais o recife apresentava um bom desempenho em modelo físico, Fortes *et al.* (2008).

Os resultados do modelo foram obtidos para todo o domínio de cálculo, mas dado o volume de resultados, a sua análise foi restringida a uma área mais reduzida sobre o recife.

Os cálculos foram efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM. O tempo de cálculo necessário para simular 600s está representado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempos de CPU (s) do modelo numérico.

Teste	COULWAVE
T=11s H=2m	≈ 23h
T=15s H=2m	≈ 8h
T=19s H=2 e 3m	≈ 4h

6.6.1. Séries de elevação da superfície livre P3 e P4

Na Figura 26 e na Figura 27 apresentam-se os valores de elevação da superfície livre obtidos numérica e experimentalmente em pontos situados ao longo das posições P3 e P4, respectivamente, para condições de agitação incidente T=15s, H=2.0m, $\theta=220^\circ$ e nível médio de maré.

Observa-se que o modelo numérico gera, na sonda s1, uma onda com características equivalentes à obtida no modelo físico, sendo evidente a sua progressiva alteração na propagação, nas secções P3 e P4, com o aparecimento de características cada vez mais não-lineares (cristas acentuadas e cavas achatadas e frente de onda mais pronunciada, “onda dente de serra”). É notória também a geração de harmónicas ao longo do domínio.

Da análise destas figuras verifica-se que, para a posição P3, o comportamento do modelo é bastante semelhante aos resultados experimentais, para todas as sondas consideradas. Já na posição P4, o modelo numérico conduz a valores inferiores da elevação da superfície livre, especialmente a partir da sonda s4, mas, de um modo geral, o modelo reproduz bem a elevação da superfície livre.

6.6.2. Índices de agitação

Na Figura 28 apresenta-se a comparação dos resultados numéricos com os experimentais em termos de índices de agitação para quatro secções transversais, S3 a S6, para as condições de agitação $\theta=220^\circ$, T=19s, H=2m e nível médio de maré. São apresentados estes resultados em particular pois este período de onda representa uma situação que à partida proporcionaria boas condições para o surf. Analisando estas figuras, observa-se que o modelo simula o empolamento da onda sobre o recife com posterior rebentação. No entanto, existem diferenças significativas que estão relacionadas com a posição de rebentação, que em geral o modelo numérico simula antes

do ocorrido em modelo físico e os valores do modelo numérico são em geral superiores aos do modelo físico, na zona antes da rebentação, mas inferiores após esta. Para a secção S3, os resultados obtidos com o modelo numérico não representam o comportamento do modelo físico tão bem como as restantes secções apresentadas. Para o mesmo período de onda, nível de maré e direcção de onda, mas $H=3\text{m}$ (Figura 29), verifica-se que a tendência é exactamente a mesma que a referida para o caso anterior, com o modelo numérico a apresentar rebentação antes do modelo físico.

Na generalidade, para ambos os casos apresentados, constata-se que o comportamento do modelo numérico acompanha o do modelo físico de forma bastante semelhante, mas os resultados experimentais apresentam uma variabilidade que não é simulada no modelo numérico. Note-se que no modelo numérico, as características reflectoras da costa não foram tidas em conta.

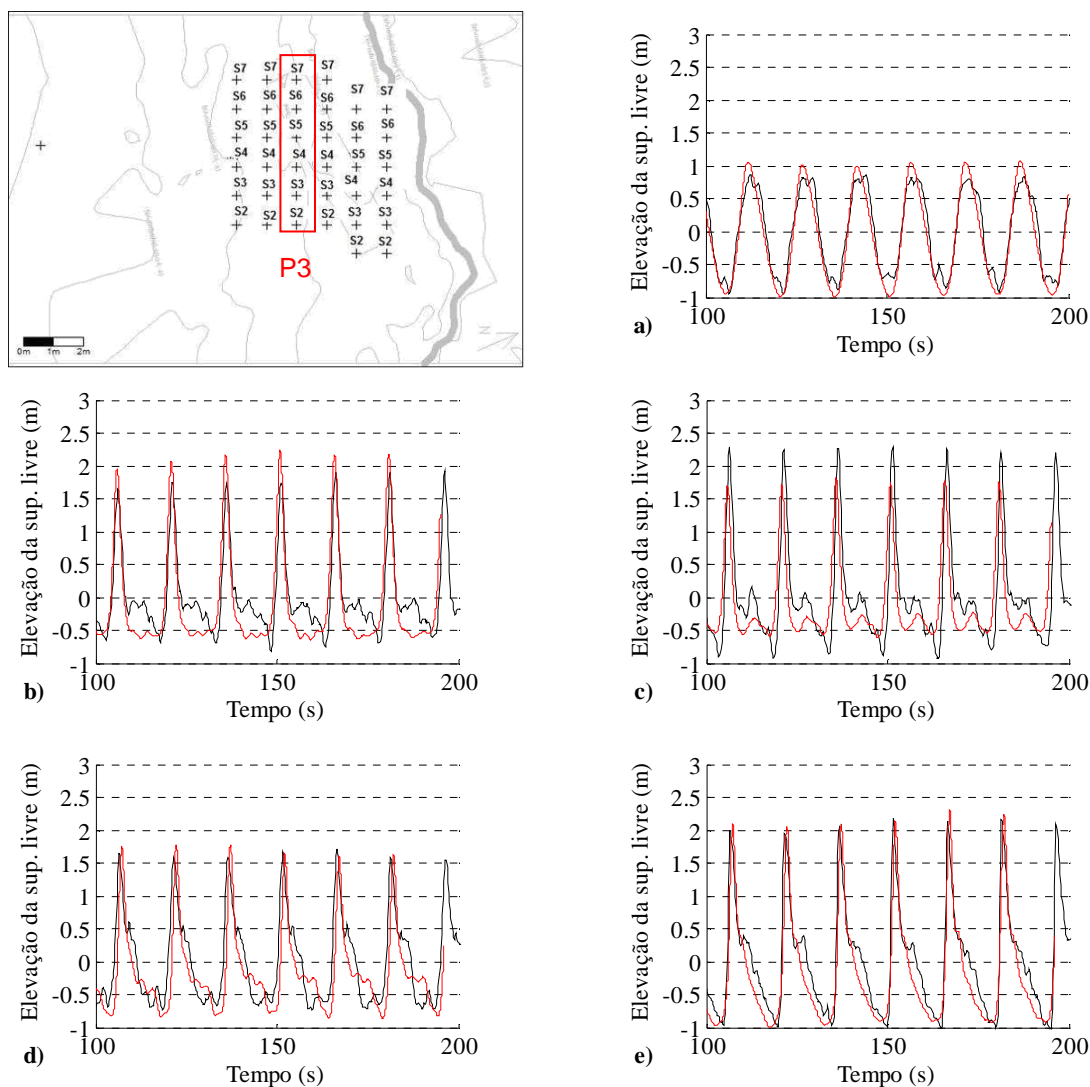


Figura 26 – Séries temporais de elevação da superfície livre para a posição P3 nas sondas a) s1; b) s3; c) s4; d) s5; e) s6. Preto – modelo físico; vermelho – modelo numérico. $T=15\text{s}$, $H=2\text{m}$; $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré.

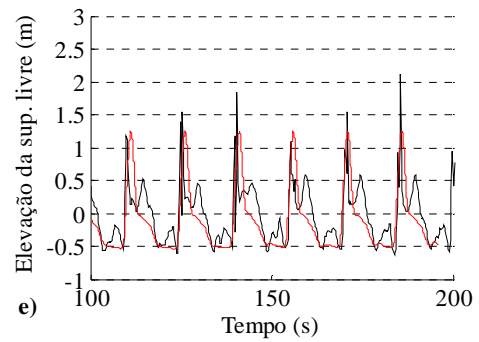
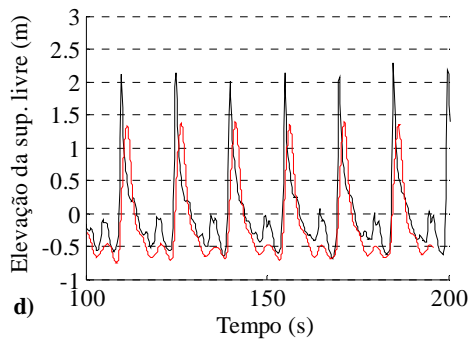
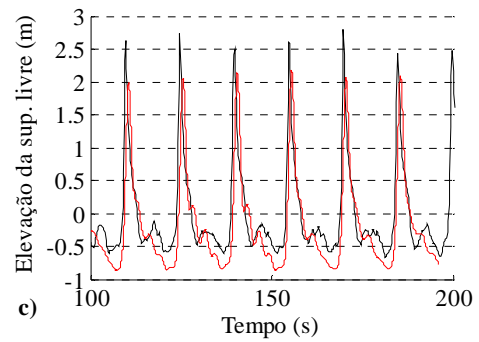
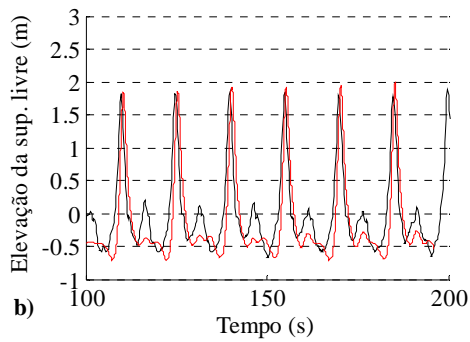
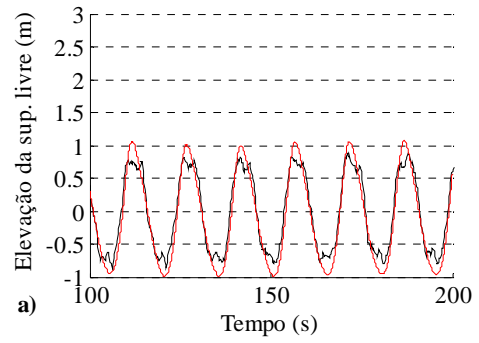
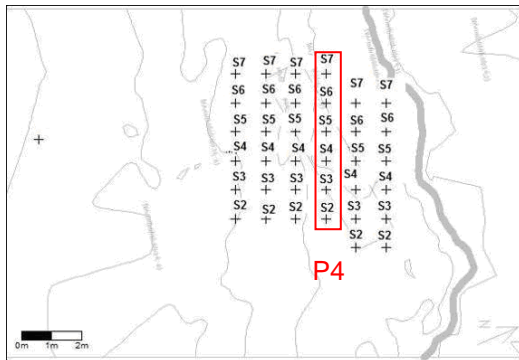


Figura 27 – Séries temporais de elevação da superfície livre para a posição P4 nas sondas a) s1; b) s3; c) s4; d) s5; e) s6. Preto – modelo físico; vermelho – modelo numérico. $T=15s$, $H=2m$; $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré.

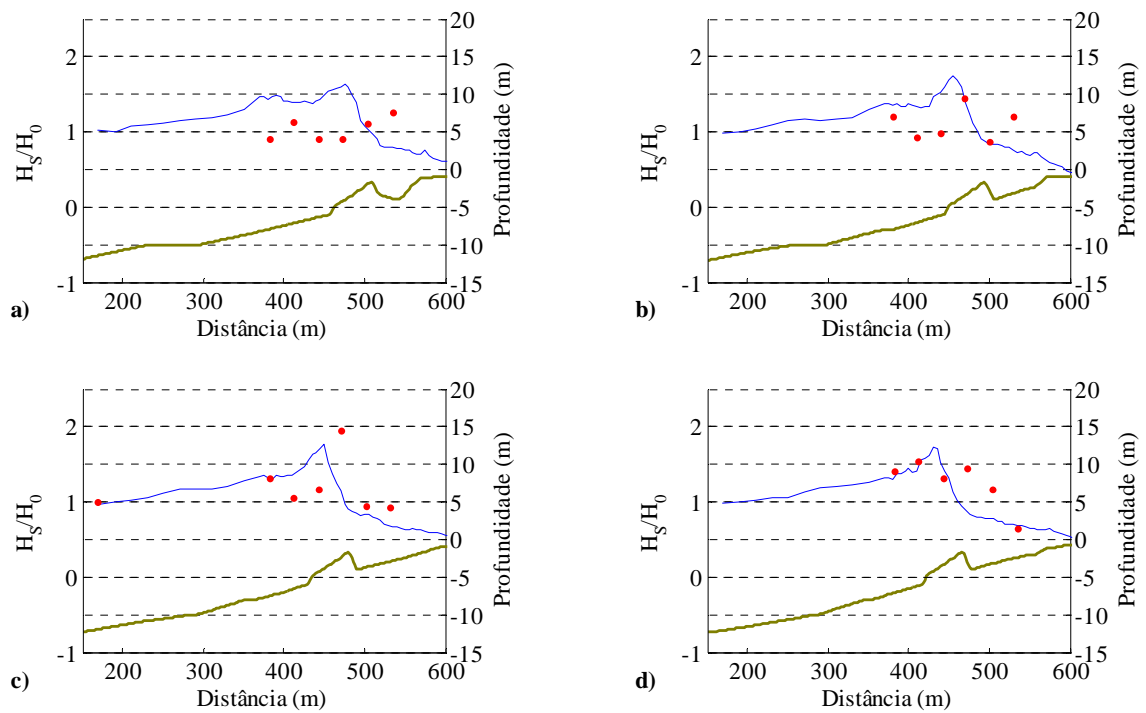


Figura 28 – Comparação de resultados numéricos (azul) e experimentais (vermelho), em termos de índices de agitação, para as secções: a) S3; b) S4; c) S5; d) S6. $T=19s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas.

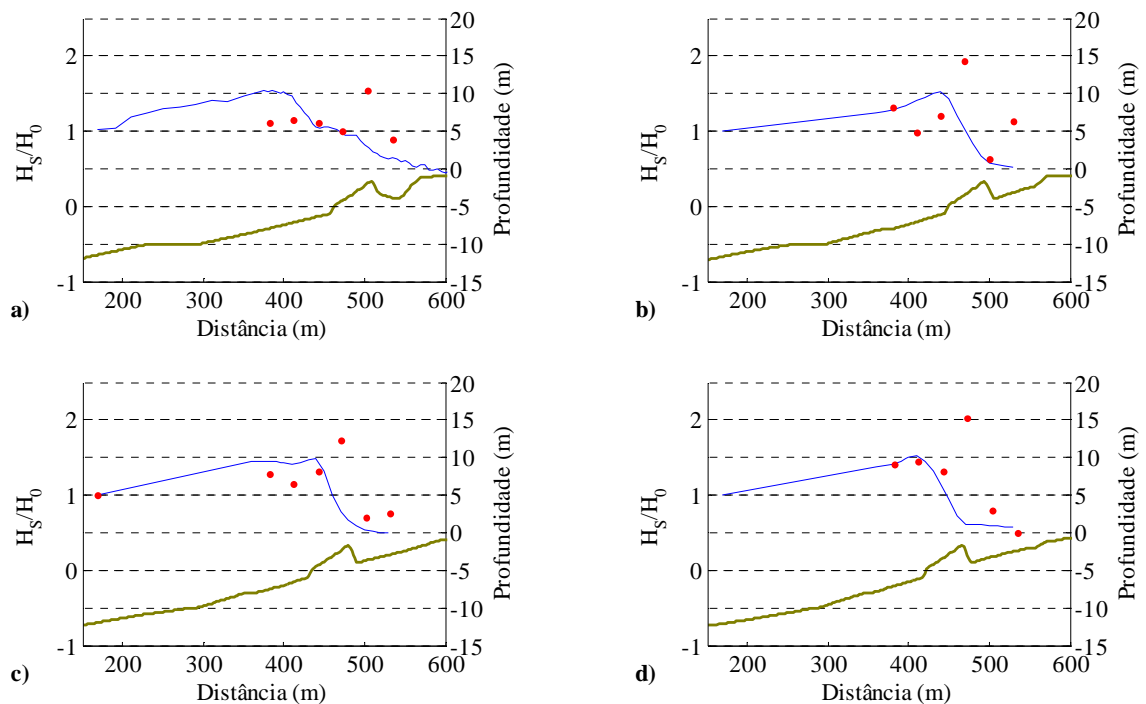


Figura 29 – Comparação de resultados numéricos (azul) e experimentais (vermelho), em termos de índices de agitação, para as secções: a) S3; b) S4; c) S5; d) S6. $T=19s$, $H=3m$, $\theta=220^\circ$. Nível médio de maré. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções representadas.

Na Figura 30, apresenta-se o gráfico das velocidades médias em torno do recife para $T=19s$, $H=2m$, $\theta=220^\circ$ e nível médio de maré. É possível observar que a presença do recife induz a formação de vórtices nos extremos da estrutura, facto este que também se verificou com o modelo físico. Para efectuar a representação do campo de velocidades foi utilizado um programa MATLAB® PLOT_CORRENTE.m (Mendonça, 2009).

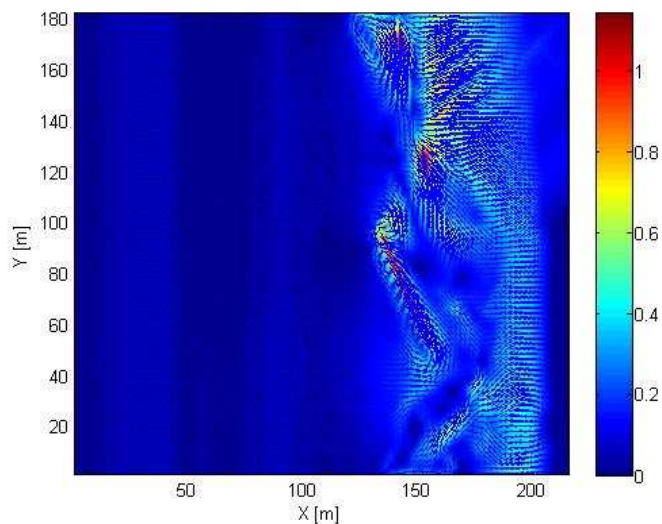


Figura 30 – Velocidade média (m/s) da corrente no domínio sobre o recife. $T=19s$ $H=2m$, $\theta=220^\circ$, nível médio de maré.

6.7. Parâmetros de surfabilidade

6.7.1. Metodologia de cálculo

O cálculo dos parâmetros de surfabilidade, como já referido, inclui:

- Determinação do número de Iribarren – para determinar o tipo de rebentação da onda obtido;
- Determinação do ângulo de rebentação – para determinar o grau de dificuldade da onda para realizar manobras de surf.

Com isto, procedeu-se ao cálculo destes parâmetros da seguinte forma:

- 1- Obteve-se a partir do modelo numérico as alturas de onda na rebentação (Figura 31) no domínio considerado, cuja representação visual foi conseguida com um programa PLOT_ALTURAS.m (Mendonça e Proença, 2009) e zonas de rebentação;
- 2- Com as zonas de rebentação, foi possível identificar as linhas de rebentação associadas;
- 3- O ângulo de rebentação, apresentado na equação (1), está relacionado com a obliquidade da onda à profundidade a que ocorre a rebentação, e assim, este parâmetro foi calculado assumindo que à medida que uma onda se propaga vai sofrendo refacção, tendendo a sua crista a ficar orientada paralelamente à batimetria

do fundo. Para cada linha de rebentação obtida, tem-se então um ângulo de rebentação;

- 4- Sabendo o comprimento de cada linha de rebentação, sabe-se a extensão na qual o recife apresenta um bom nível de surfabilidade;
- 5- Para calcular o número de Iribarren associado à rebentação obtida, recorreu-se às alturas de rebentação obtidas ao longo da linha de rebentação, aplicando-se então a equação (2);
- 6- Consultando a Tabela 2, com base nos números de Iribarren obtidos para cada caso, chegou-se ao tipo de rebentação obtida com o modelo numérico.

Na Figura 32 observa-se que a localização da zona de rebentação obtida com o modelo COULWAVE utilizando o parâmetro de rebentação $\zeta_t^{(l)}=0.35$. Estes se aproximam-se dos obtidos nos ensaios físicos apresentados em Fortes *et al.* (2008).

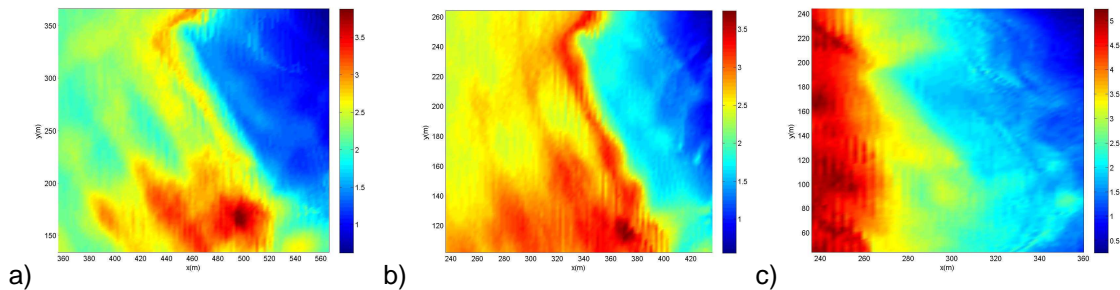


Figura 31 – Alturas de onda significativa (m) na região do recife. a) T=11s $H_0=2m$; b) T=15s, $H_0=2m$; c) T=19s $H_0=3m$. $\theta=220^\circ$, Nível médio de maré.

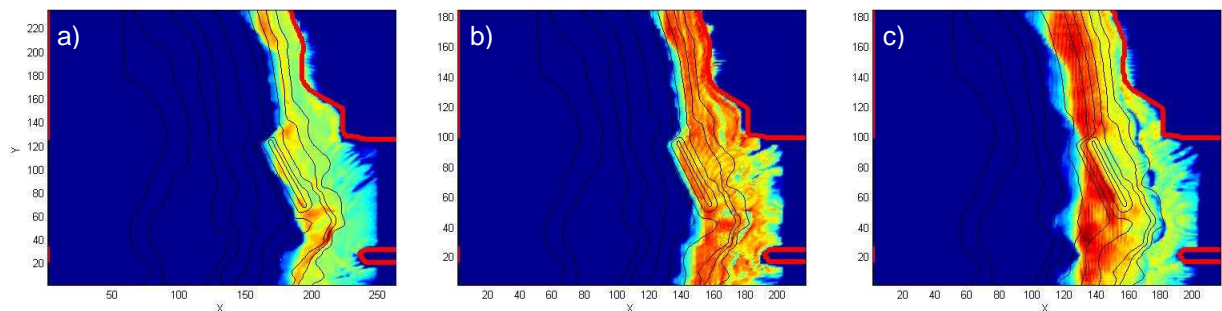


Figura 32 – Zonas de rebentação. a) T=15s H=2m; b) T=19s H=2m c) T=19s H=3m; $\theta=220$. Nível médio de maré.

6.7.2. Número de Iribarren

Com base nos resultados do modelo no que se refere à altura de onda e à direção de propagação da onda ao longo de cada uma das sete secções definidas na Figura 7, foi calculado o número de Iribarren e o ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação obtidos com o COULWAVE para as condições de agitação T=11s, T=15s e T=19s, para alturas de onda de 2m.

A Figura 33 representa o valor do número de Iribarren ao longo da linha de rebentação para os três períodos de onda considerados.

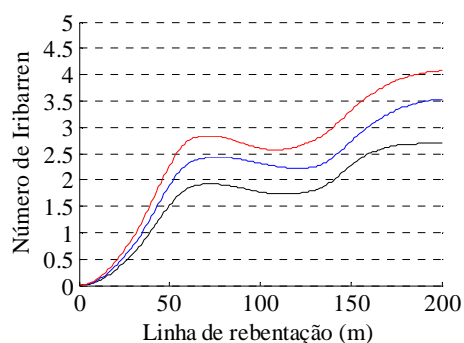


Figura 33 – Comparação do número de Iribarren para os três períodos de onda testados para $H=2\text{m}$ $\theta=220$. Nível médio de maré.

Para $T=11\text{s}$, verifica-se que nos primeiros 150m do recife (de NW para SE) a rebentação da onda é do tipo mergulhante ($0.4 < \xi_b < 2.0$), o que representa o tipo de rebentação adequada para a prática de surf de nível avançado. No entanto, para $T=15\text{s}$ e $T=19\text{s}$, $H=2\text{m}$, este comprimento reduz-se para 50m.

Verifica-se também que o número de Iribarren aumenta com o período da onda temos um aumento do número de Iribarren. É possível constatar que o período mais adequado para o surf é o de $T=11\text{s}$, pois os períodos mais elevados apresentam números de Iribarren elevados, correspondendo a um tipo de rebentação que já não é própria para o surf, nomeadamente a rebentação de fundo.

6.7.3. Ângulo de rebentação

Quanto ao ângulo de rebentação obtido, este é sempre inferior a 30° (Figura 34), o que se traduz numa velocidade do praticante adequada para surfistas experientes, de acordo com a Tabela 1. No entanto, convém referir que este valor não deve ser muito inferior, já que, quando o ângulo de rebentação é inferior a 25° , a velocidade será demasiado elevada para os surfistas, tornando impossível a prática do surf.

Os resultados do ângulo de rebentação obtidos para todos os períodos testados são muito semelhantes, sendo a única diferença visível a tendência que o ângulo de rebentação associado a $T=15\text{s}$ apresenta para descer, ao longo da linha de rebentação, e a tendência que α associado a $T=19\text{s}$ apresenta para subir. Para $T=11\text{s}$, o ângulo de rebentação não varia ao longo da linha de rebentação.

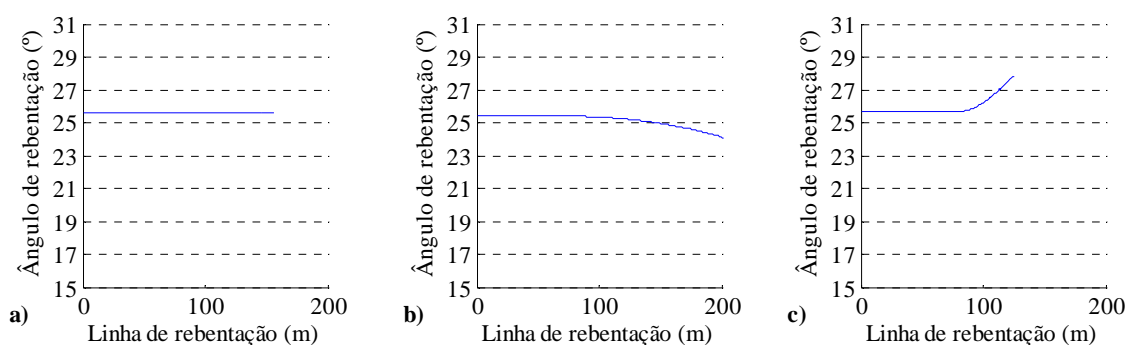


Figura 34 – Ângulos de rebentação para: a) T=11s H=2m; b) T=15s, H=2m; c) T=19s, H=3m. $\theta=220$. Nível médio de maré.

7. Discussão e Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a aplicação do modelo numérico COULWAVE ao estudo da propagação de ondas em torno de um recife artificial para surf na praia de São Pedro do Estoril, Cascais, Portugal. Os resultados obtidos foram comparados com os dados provenientes de ensaios em modelo físico realizados no LNEC para este caso de estudo, permitindo avaliar a forma como este modelo reproduz a propagação e deformação das ondas sobre o recife.

No que diz respeito aos resultados de ondas regulares obtidos com o modelo físico para os índices de agitação verificou-se de um modo geral que estes apresentavam uma grande variabilidade, não sendo portanto evidente um padrão comportamental das ondas ensaiadas.

Concluiu-se, para as ondas regulares, que na generalidade, em nível médio e preia-mar se verifica um aumento do índice de agitação sobre o recife e a posterior diminuição para rebentação. Tipicamente, a direcção de onda incidente $\theta=220^\circ$ pareceu apresentar índices de agitação mais elevados para baixa-mar e preia-mar, sendo que para o nível médio não se observam diferenças significativas com a alteração da direcção da onda incidente. Verificou-se ainda que com o aumento do nível de maré os índices de agitação diminuem em geral. Não se registaram diferenças significativas no índice de agitação com a variação da direcção de onda incidente. Por fim, concluiu-se as ondas $H_0=2m$ e $H_0=3m$ parecem ser as que apresentam melhor resposta à presença do recife, com empolamento bastante elevado sobre este, seguido de uma diminuição brusca.

Para as ondas irregulares, conclui-se que, para nível médio de maré, um aumento do período de pico está associado a um aumento do índice de agitação. Verificou-se ainda que ambas as alturas testadas apresentam um comportamento extremamente semelhante. Tais resultados, é possível que se devam ao facto de na verdade, as ondas geradas no modelo não terem exactamente $H_0=3m$ e $H_0=4m$, encontrando-se os seus valores iniciais bem mais próximos um do outro do que o pretendido.

Outra conclusão importante a salientar relativamente às ondas irregulares é o facto da direcção de onda de 220° produzir maior empolamento das ondas testadas. Em termos de nível de

maré, é para o nível médio que parece haver também maior elevação da onda com a presença do recife.

De uma maneira geral, verificou-se um bom desempenho do modelo numérico para o caso em que foi aplicado, reproduzindo razoavelmente o comportamento apresentado pelos resultados provenientes do modelo físico.

Em termos de resultados do modelo numérico, as séries temporais de superfície livre conseguidas apresentaram-se muito próximas das obtidas com o modelo físico, vindo corroborar o facto de o modelo numérico estar a representar bem o comportamento do modelo físico. O modelo consegue simular a transformação da forma da onda ao longo do domínio de cálculo e a geração de harmónicas.

Em relação às alturas de onda, verifica-se em geral que o comportamento dos resultados numéricos é bastante semelhante aos do modelo físico, apresentando nos casos testados o empolamento da onda sobre o recife e posterior rebentação

No entanto, existem diferenças entre os resultados numéricos e físicos, principalmente após a rebentação. A formulação da rebentação do modelo, bem como as hipóteses base do modelo (integração em profundidade), não permitem descrever a transformação da onda nesta zona com características tão tridimensional. É importante ainda referir, relativamente ao modelo numérico, que o seu tempo de cálculo constitui um factor extremamente limitante.

Finalmente, apenas com base nos resultados numéricos, determinaram-se os parâmetros de surfabilidade (ângulo de rebentação e tipo de rebentação) que caracterizam o funcionamento do recife para o surf. Com estes tiraram-se algumas conclusões importantes, nomeadamente de que, através da análise do número de Iribarren, o período de onda de 11s produz um tipo de rebentação mais adequada para a prática de surf, mais concretamente rebentação mergulhante. Os ângulos de rebentação obtidos apresentaram valores adequados, mas ainda assim, com tendência a ser um pouco baixos, o que se traduz em ondas com velocidade possivelmente demasiado elevada, exigindo conseqüentemente, um nível mais elevado também de experiência por parte dos surfistas.

Como conclusão, o modelo COULWAVE tem potencialidades para ser utilizado neste tipo de estudos, mas a sua utilização terá de ser precedida por uma calibração dos vários parâmetros relacionados com a rebentação. A sua importante limitação é o tempo de cálculo excessivo, sendo a utilização da versão paralelizada do modelo uma alternativa promissora.

8. Bibliografia

- Battjes, J.A., 1974. *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*. Ph. D. thesis. Technical University of Delft.
- British Broadcasting Corporation (BBC), 2007. *About the Boscombe surf reef*, acessado a 01/6/2009 em http://www.bbc.co.uk/dorset/content/articles/2007/12/17/bournemouth_reef_feature.shtml
- Bicudo, P.; Cardoso, N., 2007a. *Numerical Modelling for the Coastal Protection Induced by the Surf Reef*. Relatório No CMC/IST/FCUL/LNEC-MOD_IST/08.
- Bicudo, P.; Cardoso, N., 2007b. *Numerical Modelling for the Orientation and Slope of the Reef's Top*. Relatório No CMC/IST/FCUL/LNEC-MOD_IST/07.
- Bicudo, P.; Monteiro, P. P.; Mendes, L.S.; Custódio, A. M. O.; Costa, H. P., 2007 *Avaliação das alternativas para a localização do projecto do recife para a melhoria do surf em São Pedro do Estoril*. Relatório CMC/IST/FCUL/LNEC- COOR/04.
- Carvalho, M. J. S. M., 1973. *Simulação da Agitação Irregular*. *Técnicas Matemáticas*. Tese apresentada a concurso para especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Chen, Q.; Kirby, J. T.; Dalrymple, R. A.; Kennedy, B. A.; Chawla, A., 2000. Boussinesq Modelling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. II: 2D. *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126, 48–56.
- Dalrymple, R. A.; Kirby, J. T., 1991. *REFDIF 1 Version 2.3. Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*. CACR Report nº 91-2, University of Delaware, January.
- Fortes C. J. E. M.; Capitão, R.; Neves, M. G.; Monteiro, P. P.; Mendes, L. S., 2007a. *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*. *Estudos de modelação numérica e física*. *Regimes de agitação marítima*. Relatório 172/07. Abril.
- Fortes, C. J. E. M.; Mendonça, A.; Proença, B., 2009. REGISTOS_SURF. Programa Fortran.
- Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G.; Mendes, L.; Monteiro, P., 2007b. *Viabilidade de 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*. *Estudos de modelação numérica e física*. *Recifes artificiais para o surf: revisão bibliográfica*. Relatório ***/07-NPE.
- Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G.; Mendes, L. S.; Monteiro, P. P.; Palha, A.; Capitão, R.; Bicudo, P.; Custódio, A.; Costa, H.; Almeida, N.; Cardoso, N.; Carias, L.; Fialho, M. J.; Carvalho, L., 2007c. *Viability Study of an artificial Surf Reef in the S. Pedro Beach*. *IV Congress of the Planning of Coastal Zones of the Portuguese Speaking Countries (IVCPGC)*. Madeira, Outubro.
- Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G.; Pinheiro, L.; Mendes, L.; Monteiro, P.; Palha, A., 2008. *Modelação numérica e física de um recife artificial para surf na praia de S. Pedro do Estoril*. *Revista da Engenharia e Vida*. Maio.
- Hutt, J. A.; Black, K. P.; Mead, S. T., 2001. Classification of surf breaks in relation to surfing skill. In: Black, K.P. (ed.), *Natural and Artificial reefs for Surfing and Coastal Protection*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 29, pp. 66-81.

- Jackson, A., 2001. Special Construction Requirements for Artificial Surfing Reefs, *Journal of Coastal Research*, special edition No. 29.
- Kirby, J.; Wei, G.; Chen, Q.; Kennedy, A.; Dalrymple, R., 1998. *FUNWAVE 1.0 Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual*. Center of Applied Coastal Research. Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716. Research Report No. CACR-98-06, September
- Leite, L., 2008. *Intervenções de Defesa das Zonas Costeiras. Estudo Hidrodinâmico de um Recife Artificial para o Surf*. Trabalho de seminário, Universidade de Aveiro.
- Leite, L.; Fortes, C. J. E. M.; Coelho, C.; Dias, J. M, 2008. Estudo hidrodinâmico de um recife artificial para surf. *Jornadas do Mar*, Novembro.
- Lynett, P.J.; Liu, P. L.-F., 2004. *Modelling wave generation, evolution and interaction with depth – Integrated Dispersive wave equations – COULWAVE Code Manual, Cornell University Long. Inter. Wave Modelling Package*.
- Lynett, P. J.; Wu, T.-R.; Liu, P. L.-F., 2002. Modeling wave runup with depth-integrated equations. *Coastal Engineering*.
- Mendes, L. S.; Neves, M. G.; Fortes C. J.; Monteiro, P. P., 2007. *Programa MOREIAS. Análise do funcionamento de um recife artificial. Aplicações*. Relatório /07-NPE. Julho
- Mendonça, A., 2009. PLOT_CORRENTE.m. Programa MATLAB
- Mendonça, A.; Neves, M. G.; Fortes, C. J., 2009. Numerical Study of Hydrodynamics Around an Artificial Reef for São Pedro do Estoril, Portugal – 10th International Coastal Symposium. *Journal of Coastal Research*.
- Mendonça, A.; Proença, B., 2009. PLOT_ALTURAS.m. Programa MATLAB
- Neves, M. G.; Fortes C. J.; Mendes, L. S; Monteiro, P. P., 2007. *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. Estudos de modelação numérica e física. Metodologias de trabalho*. Relatório182/07-NPE.
- Pinheiro, L.; Fortes, C. J. E. M, 2008a. SOPRO_ANOIAGI. Programa em Excel com Visual Basic for Applications.
- Pinheiro, L.; Fortes, C. J. E. M., 2008b. SOPRO_CRIA_FIGURAS. Programa em Excel com Visual Basic for Applications.
- Walker, J. R., 1974. *Recreational surf parameters*. Technical Report, University of Hawaii, James K.K. Look Laboratory of Oceanographic Engineering
- Wei, G.; Kirby, J. T.; Grilli, S. T.; Subramanya, R., 1995. A fully Nonlinear Boussinesq Model for Surface Waves. Part 1. Highly Nonlinear Unsteady Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 71-92.
- Zelt, J. A., 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves, *Coastal Engineering*,. 15, 205-246.

Anexo I. Ondas Irregulares - Modelo Físico

Da Figura Al.1 à Figura Al.8 é possível observar os resultados de ondas regulares provenientes do modelo físico em termos de índice de agitação.

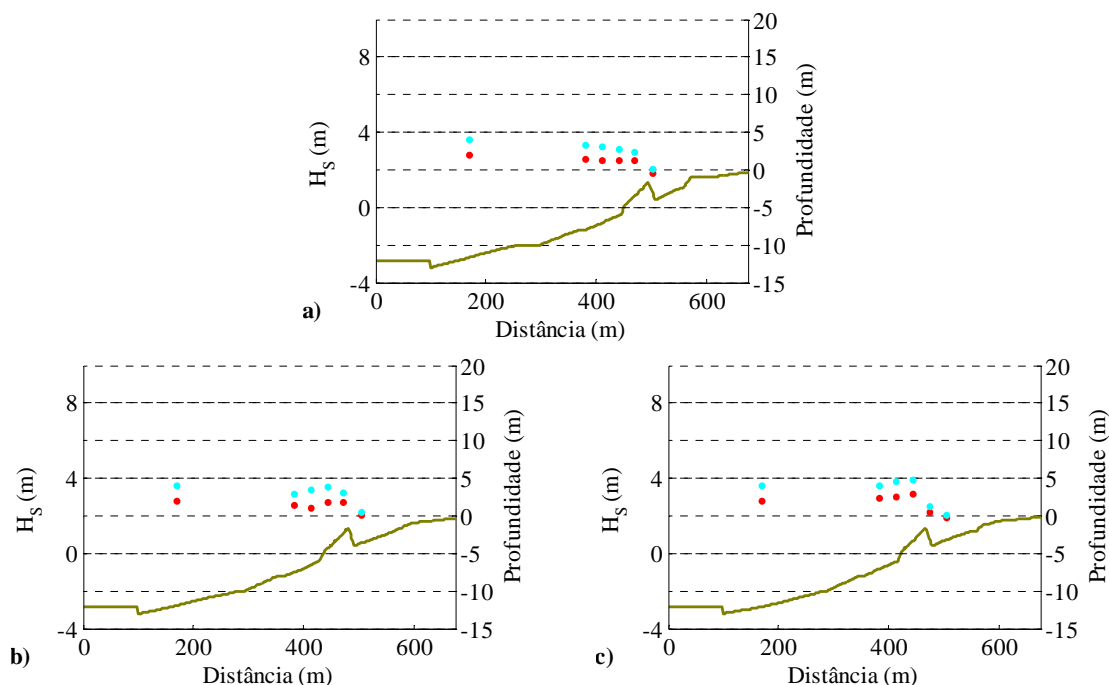


Figura Al.1 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

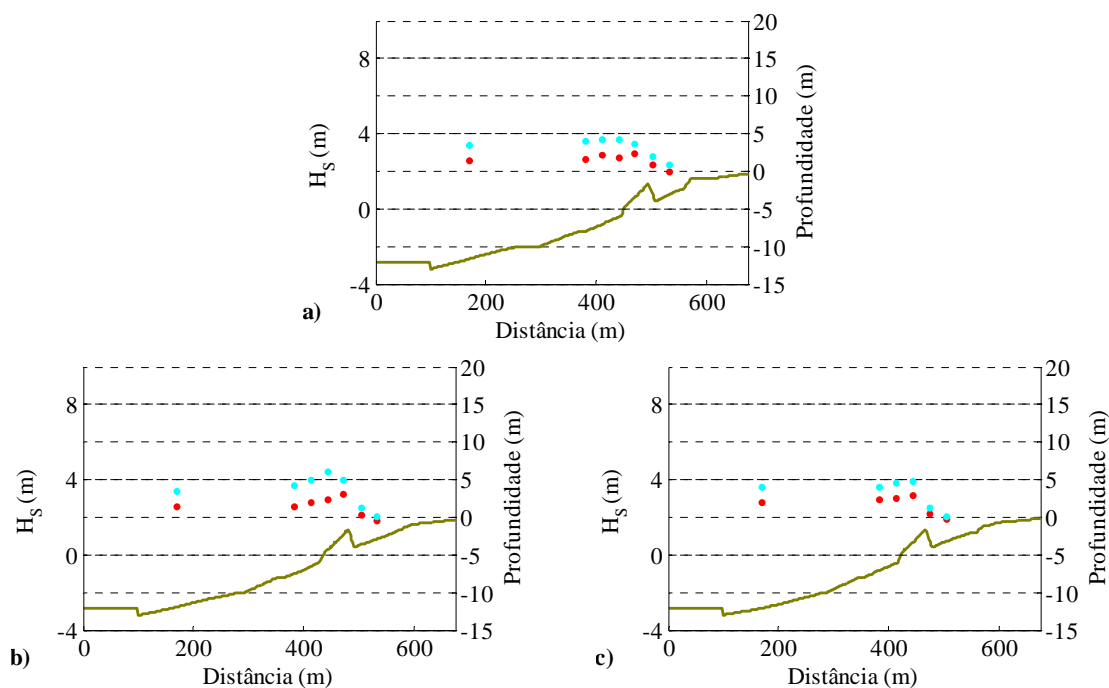


Figura Al.2 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

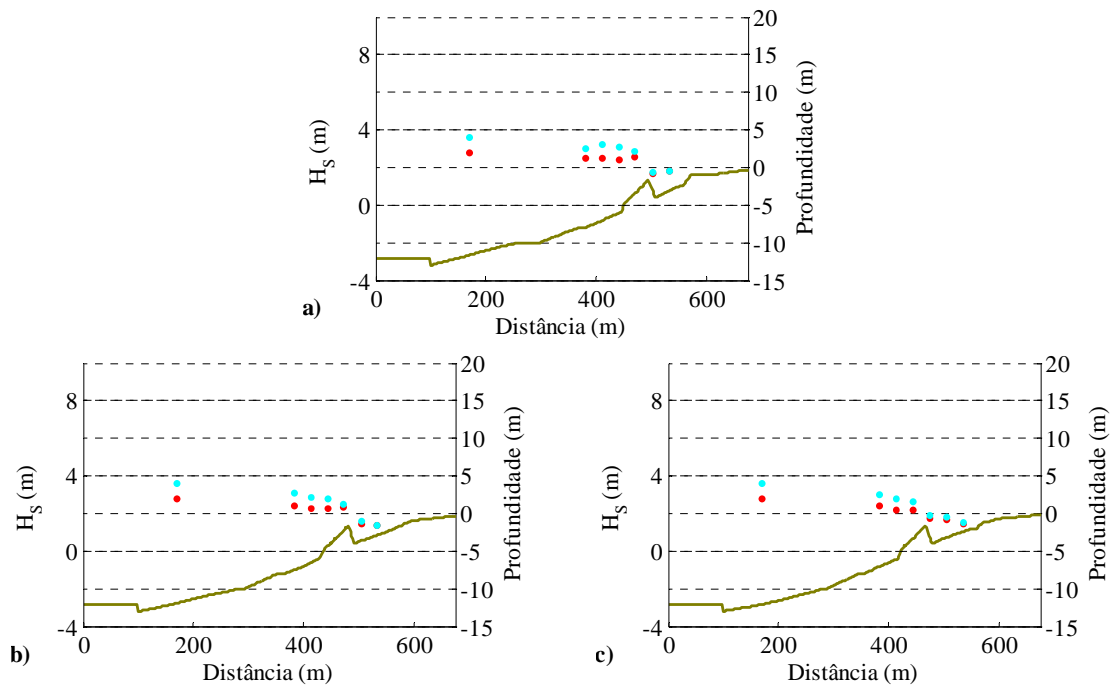


Figura A1.3 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

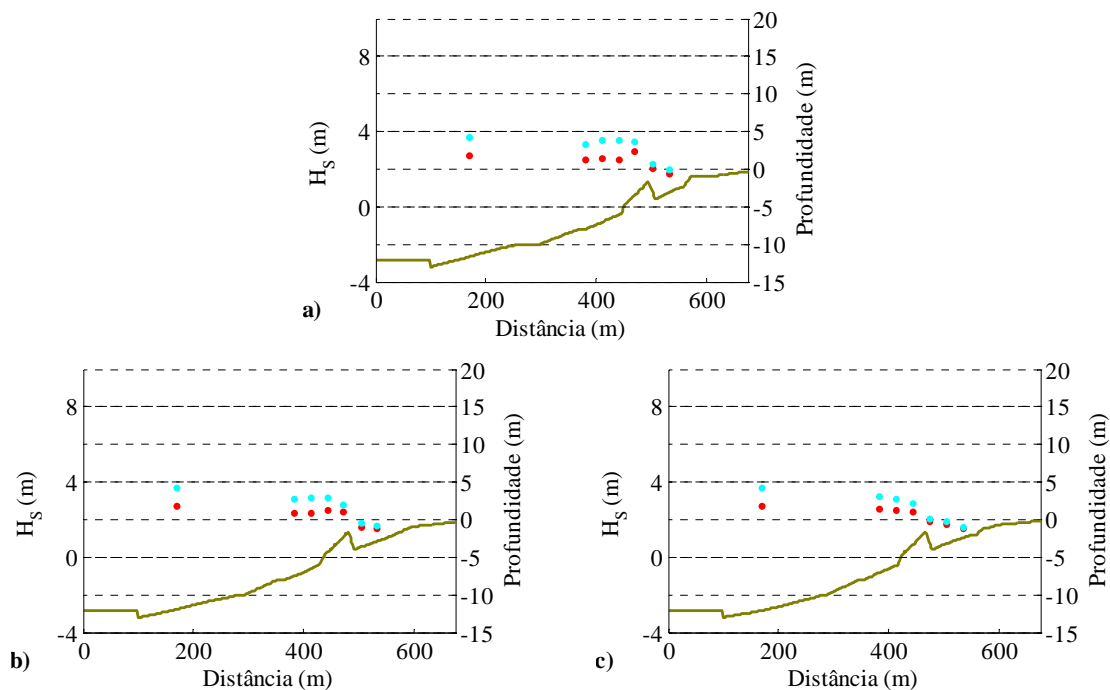


Figura A1.4 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Nível médio. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

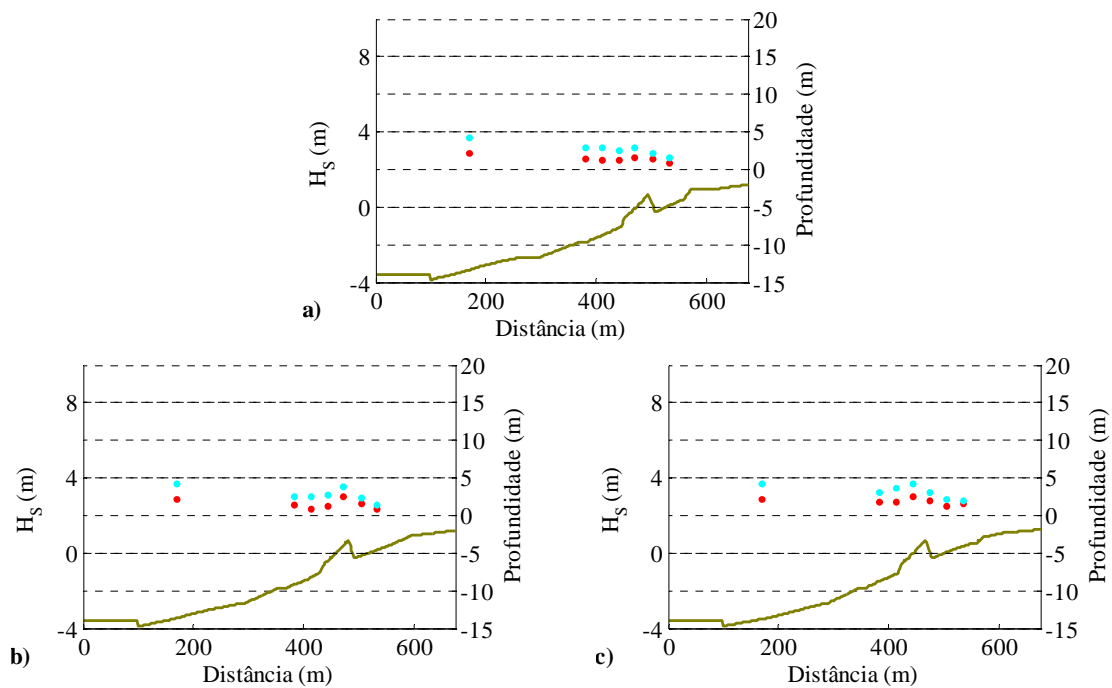


Figura A1.5 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

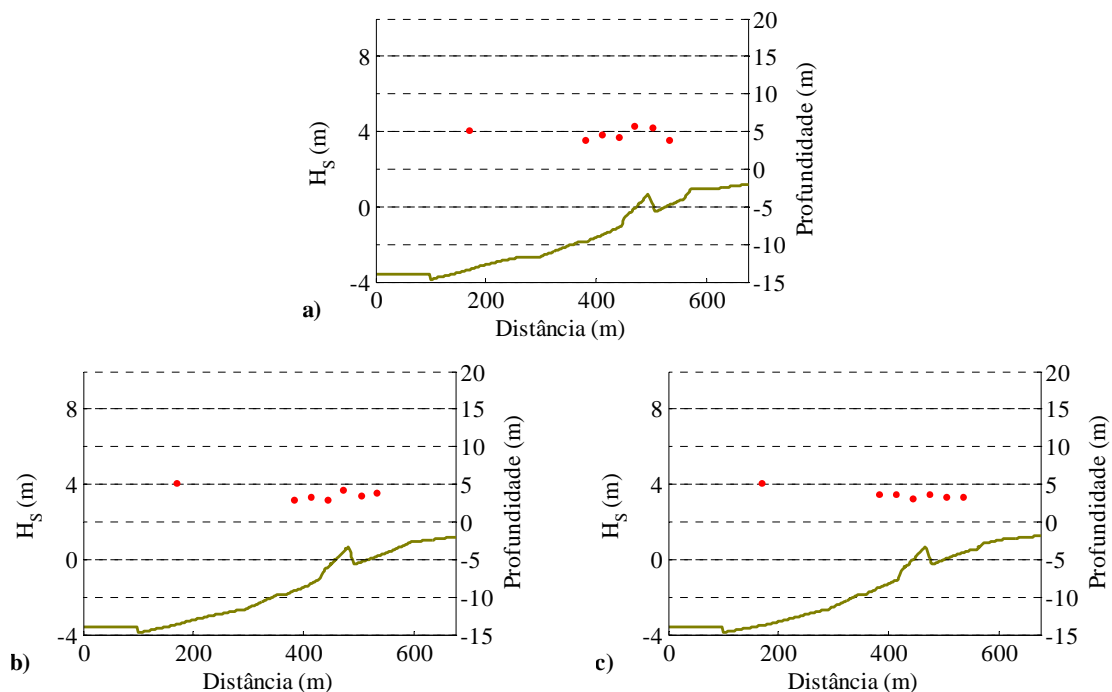


Figura A1.6 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=220^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

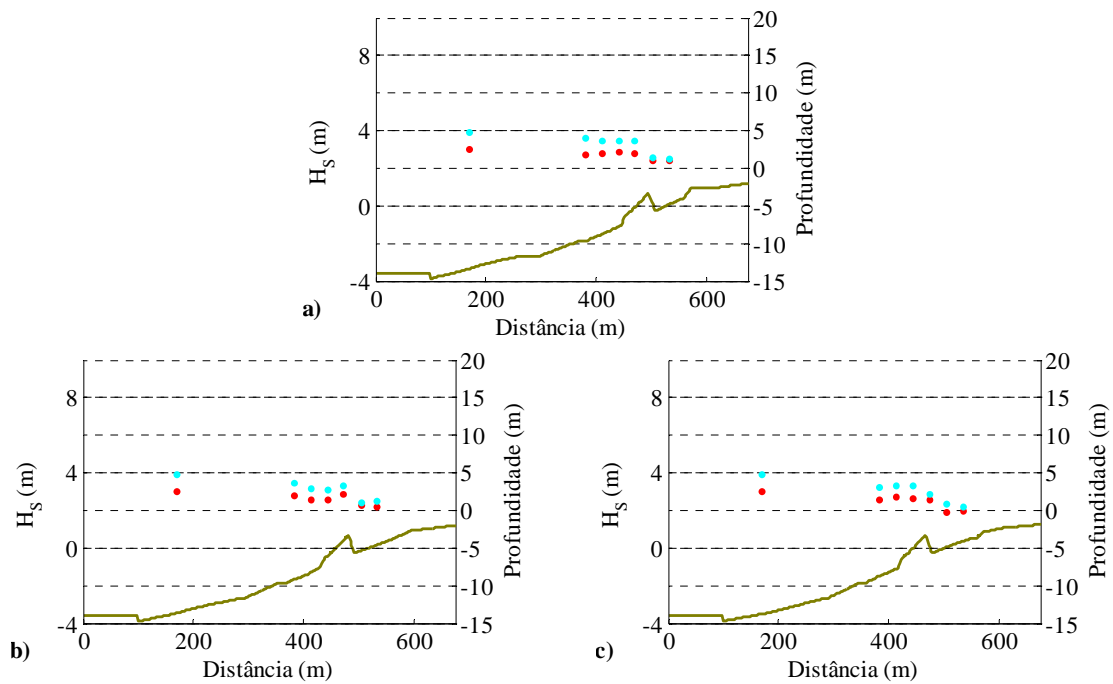


Figura A1.7 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=11s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

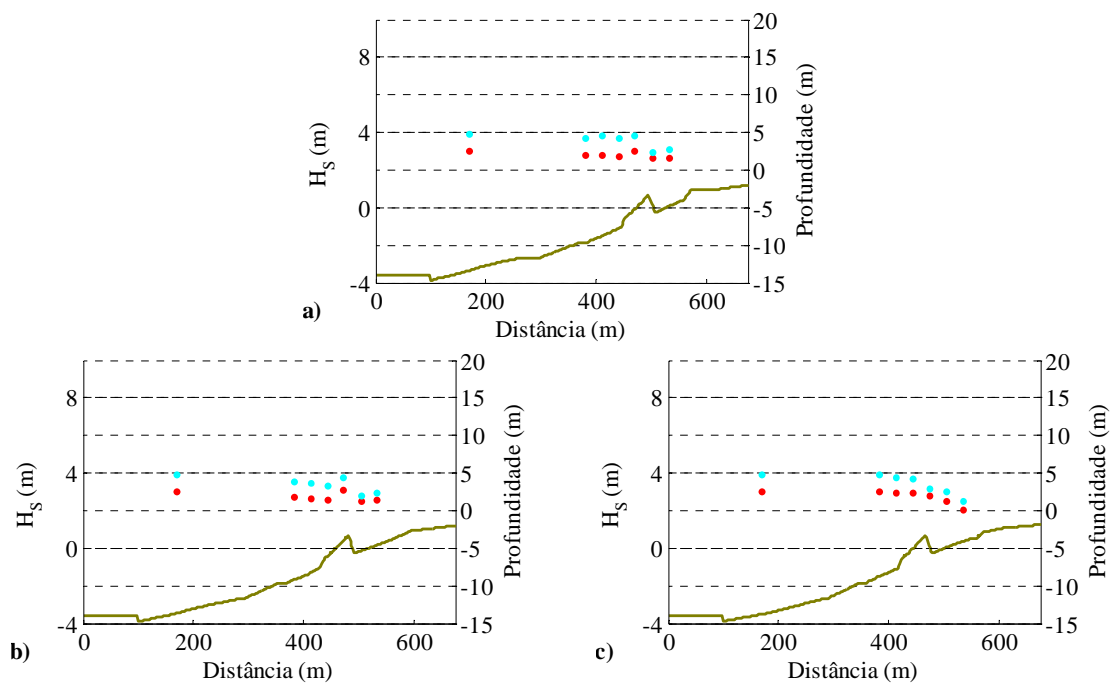


Figura A1.8 – Alturas de onda obtidas com o ensaio físico. Ondas irregulares $T=15s$, $\theta=235^\circ$, secções transversais a) S4; b) S5; c) S6. Preia-mar. Vermelho – $H_0=3m$; azul claro – $H_0=4m$. A linha contínua representa a batimetria com recife para as secções apresentadas.

Anexo II.Figuras das alturas de onda e índices de agitação para ondas irregulares obtidos em modelo físico

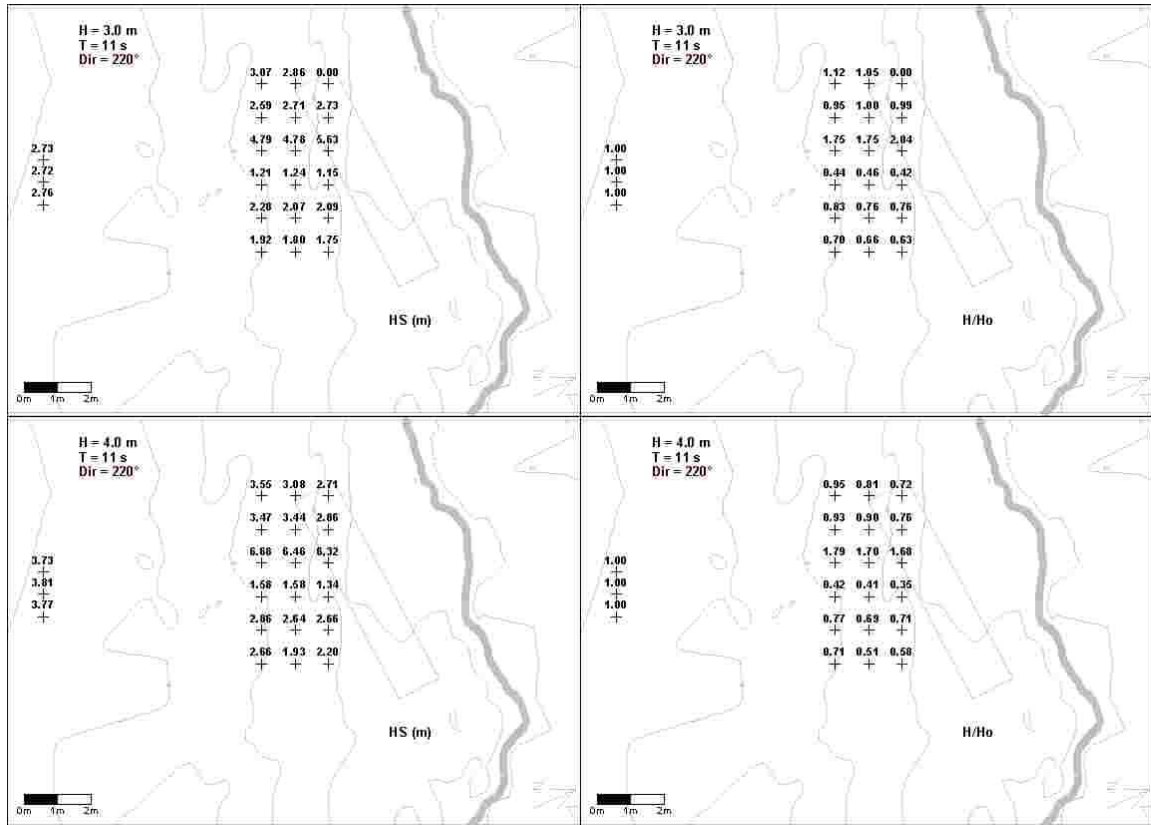


Figura AII.1 – Situação com recife. Onda incidente de T=11s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

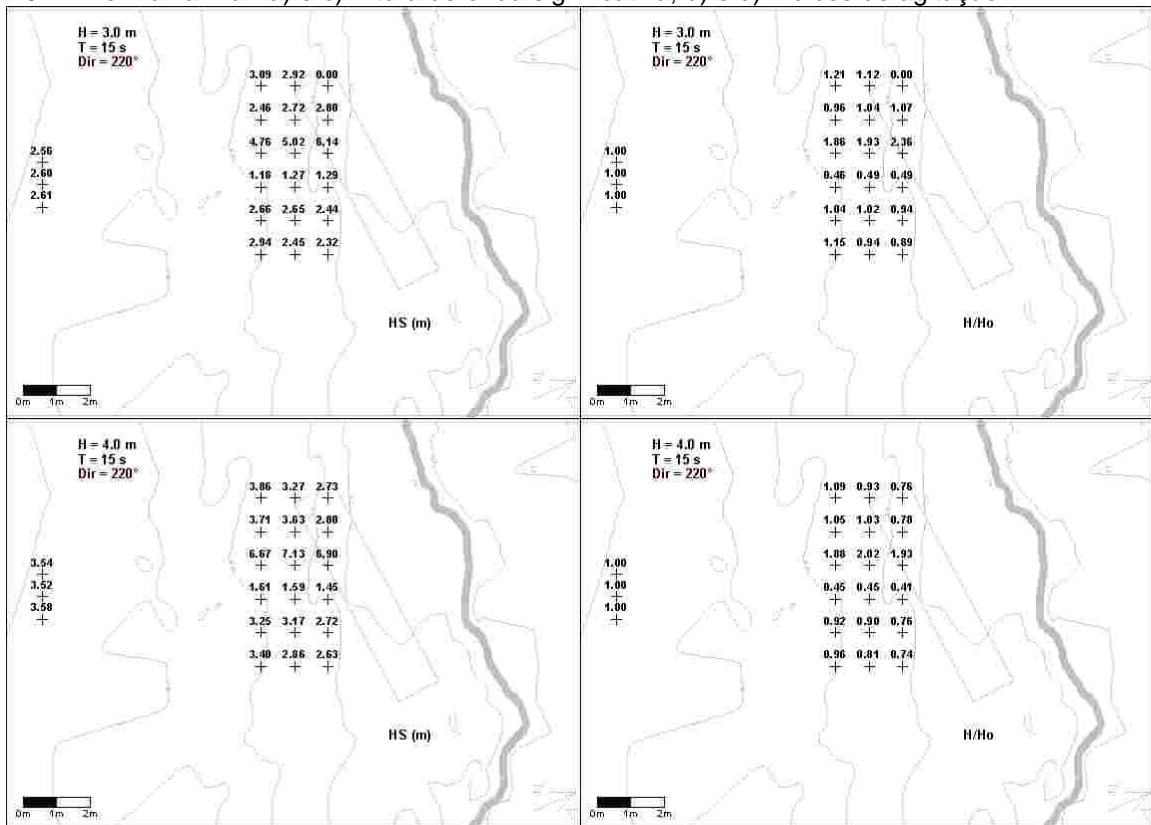


Figura AII.2 – Situação com recife. Onda incidente de T=15s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível Baixa-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

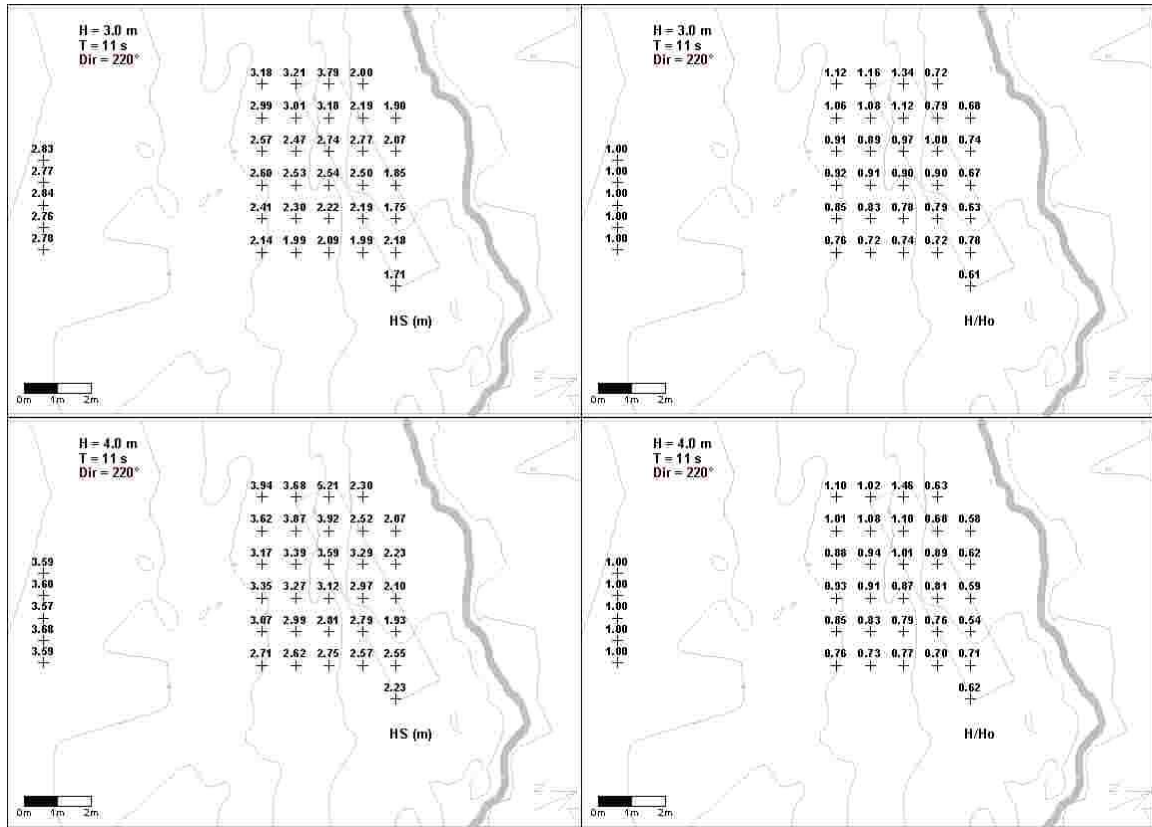


Figura AII.3 – Situação com recife. Onda incidente de T=11s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível médio. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

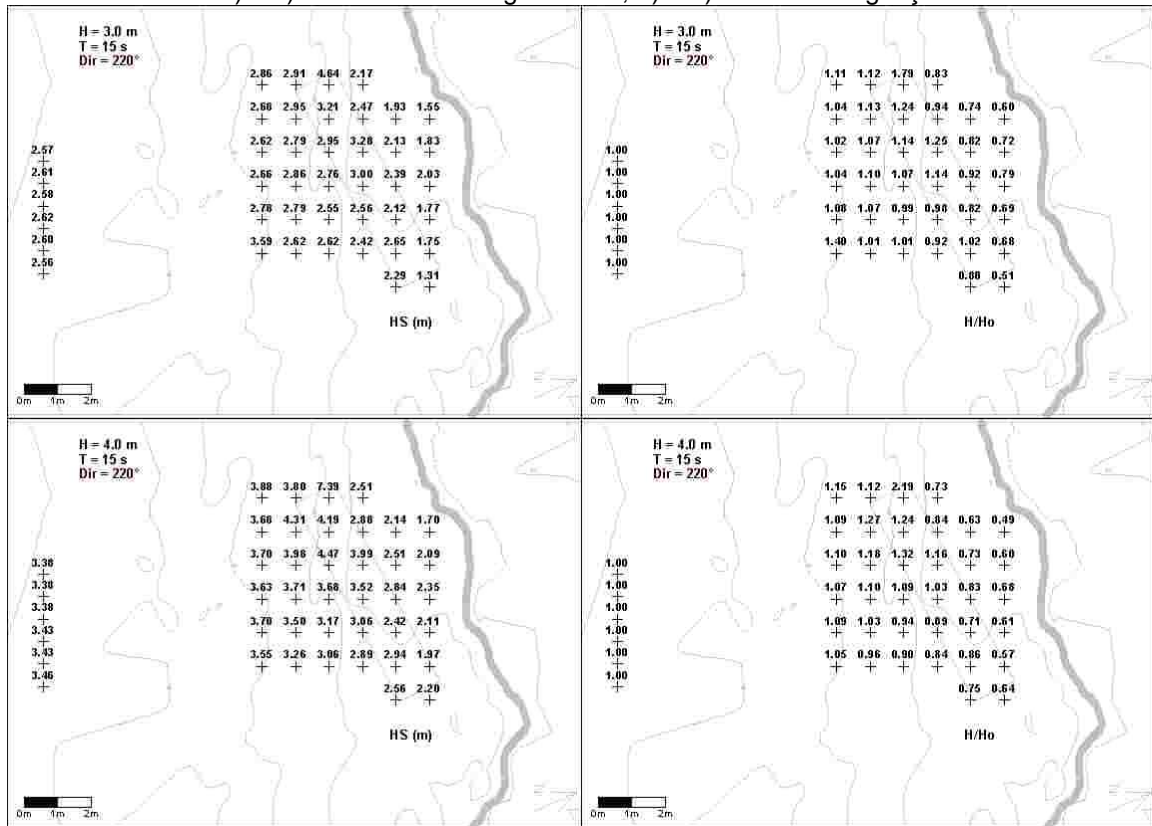


Figura AII.4 – Situação com recife. Onda incidente de T=15s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível médio. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

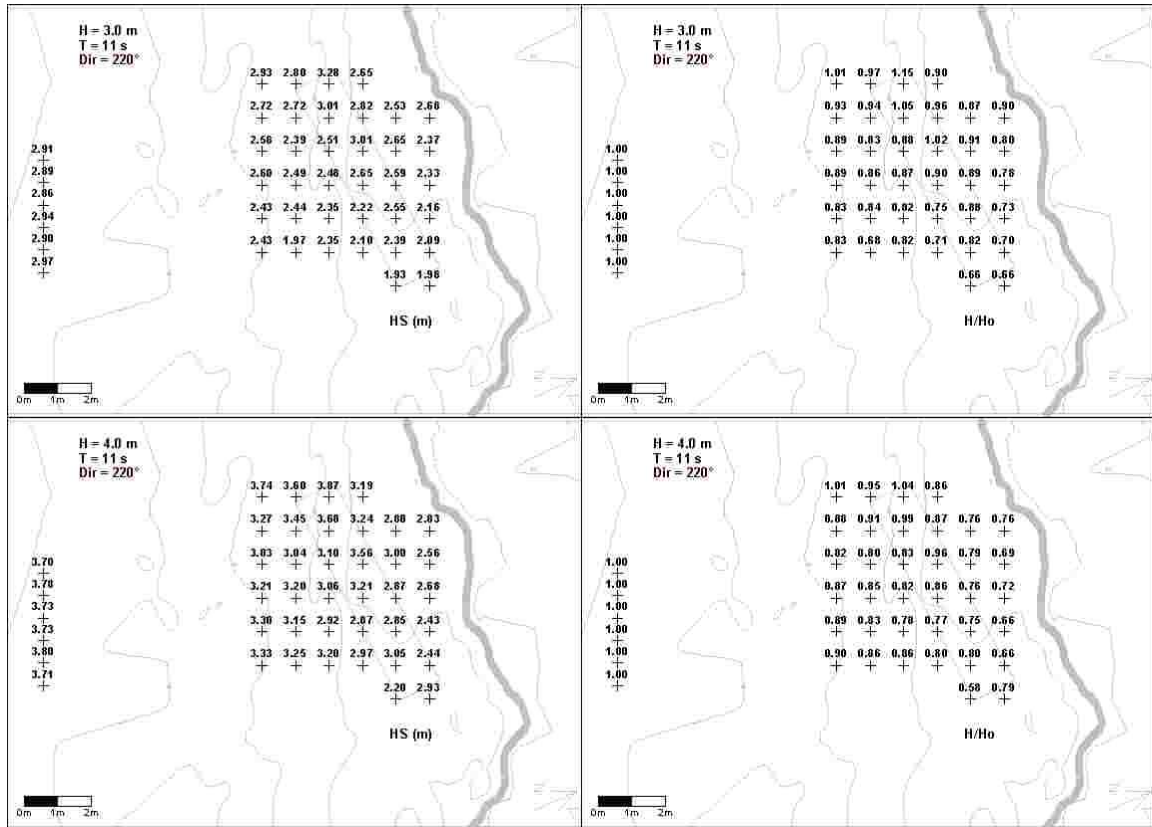


Figura AII.5 – Situação com recife. Onda incidente de T=11s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível Preia-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

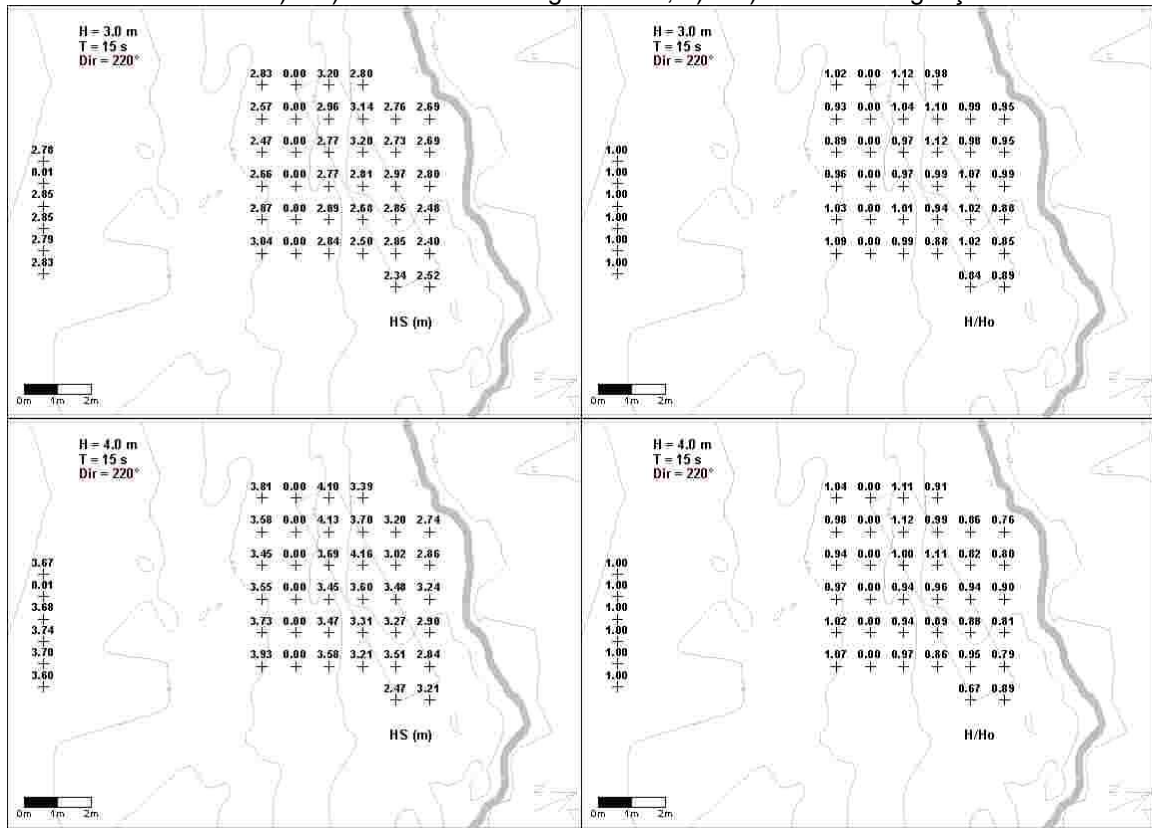


Figura AII.6 – Situação com recife. Onda incidente de T=15s, H=3m e H=4m, direcção incidente de 220°. Nível Preia-mar. a) e c) Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

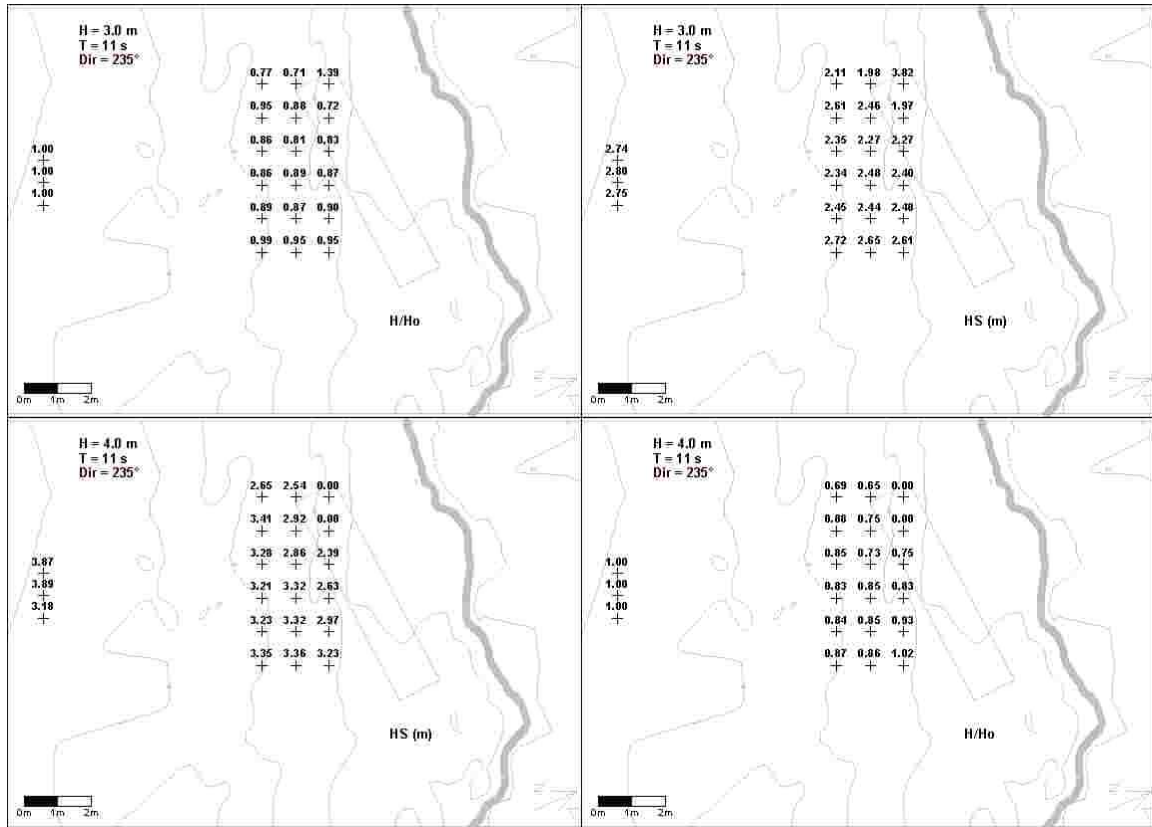


Figura AII.7 – Situação com recife. Onda incidente de $T=11$, $H=3\text{m}$ e $H=4\text{m}$, direcção incidente de 235° Nível Baixa-mar, Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

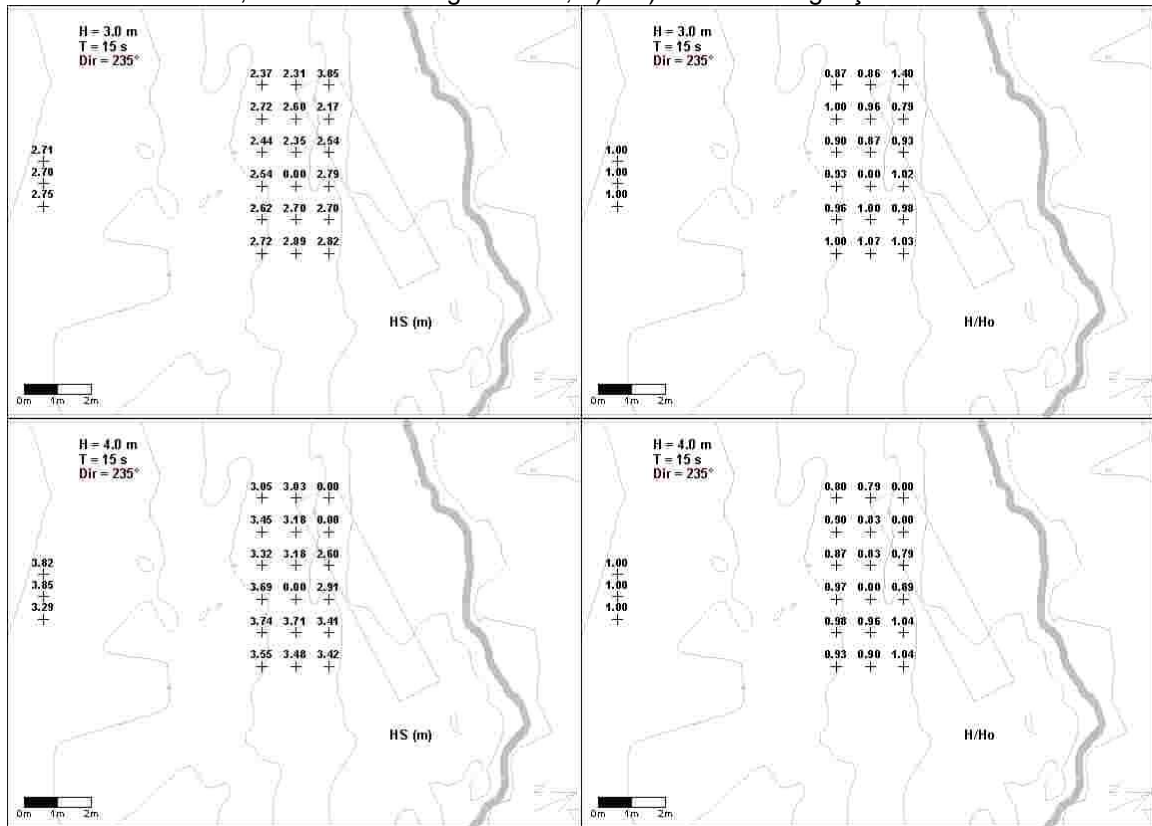


Figura AII.8 – Situação com recife. Onda incidente de $T=15$ $H=3\text{m}$ e $H=4\text{m}$, direcção incidente de 235° Nível Baixa-mar, Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

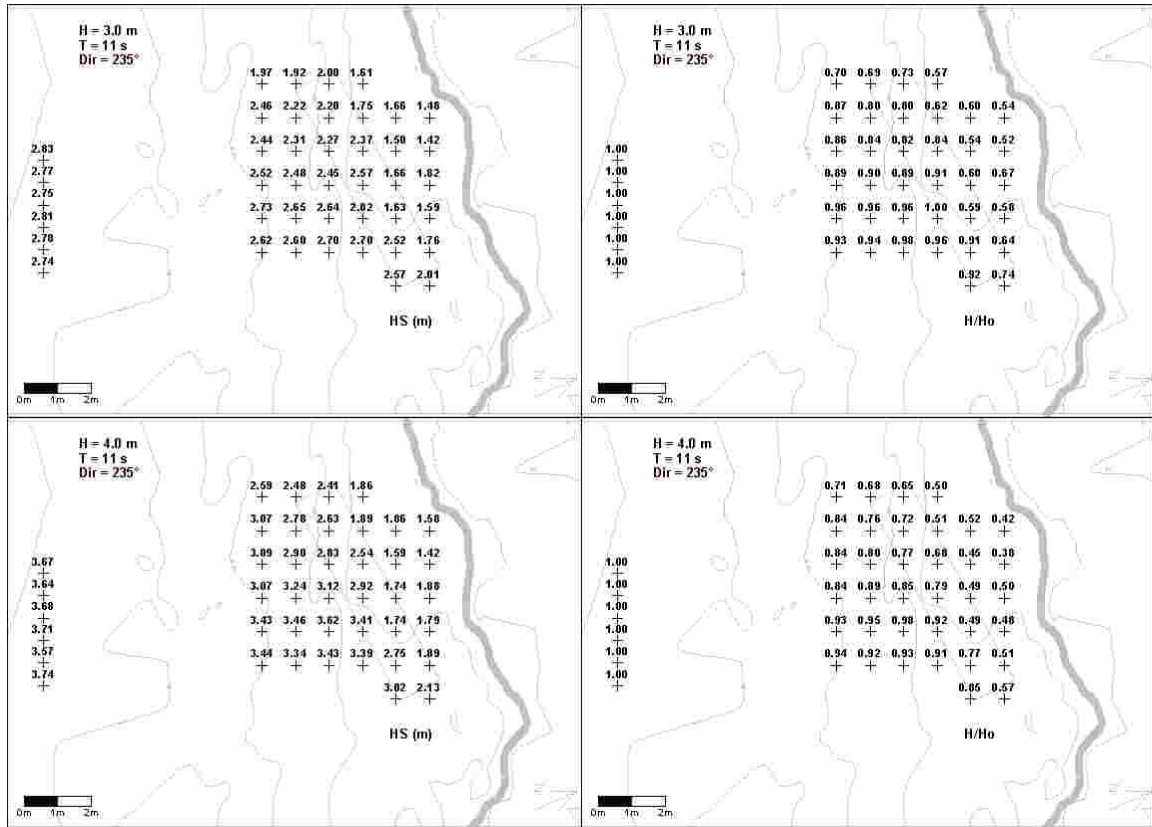


Figura AII.9 – Situação com recife. Onda incidente de T=11H=3m e H=4m, direcção incidente de 235°Nível médio. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

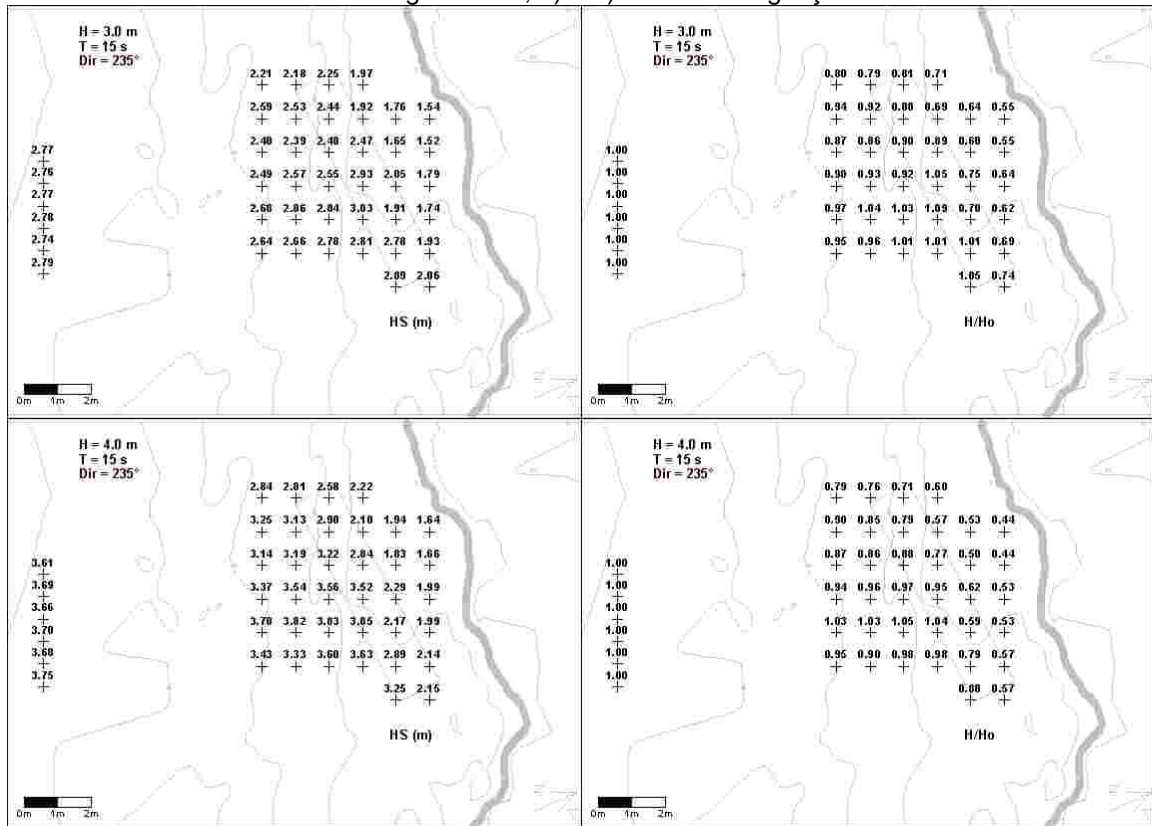


Figura AII.10 – Situação com recife. Onda incidente de T=15 H=3m e H=4m, direcção incidente de 235°Nível médio. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

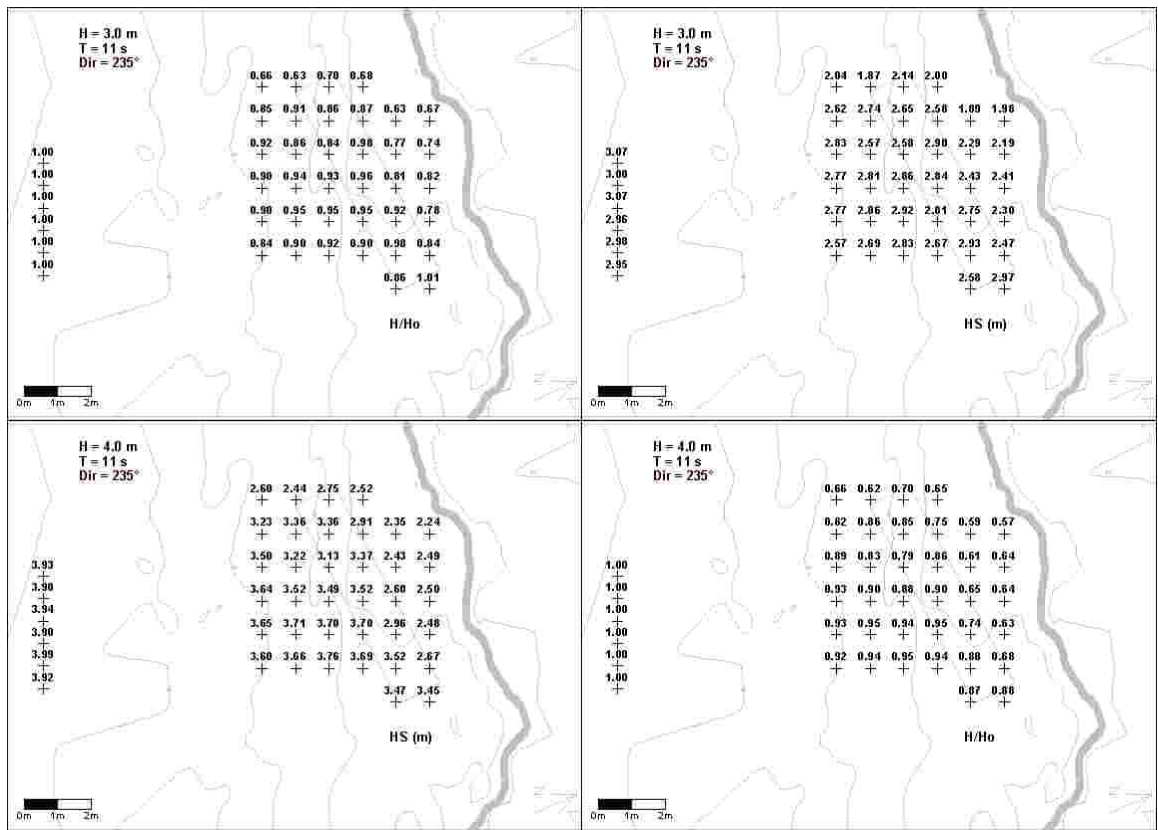


Figura AII.11 – Situação com recife. Onda incidente de T=11s H=3m e H=4m, direcção incidente de 235° Preia-mar. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.

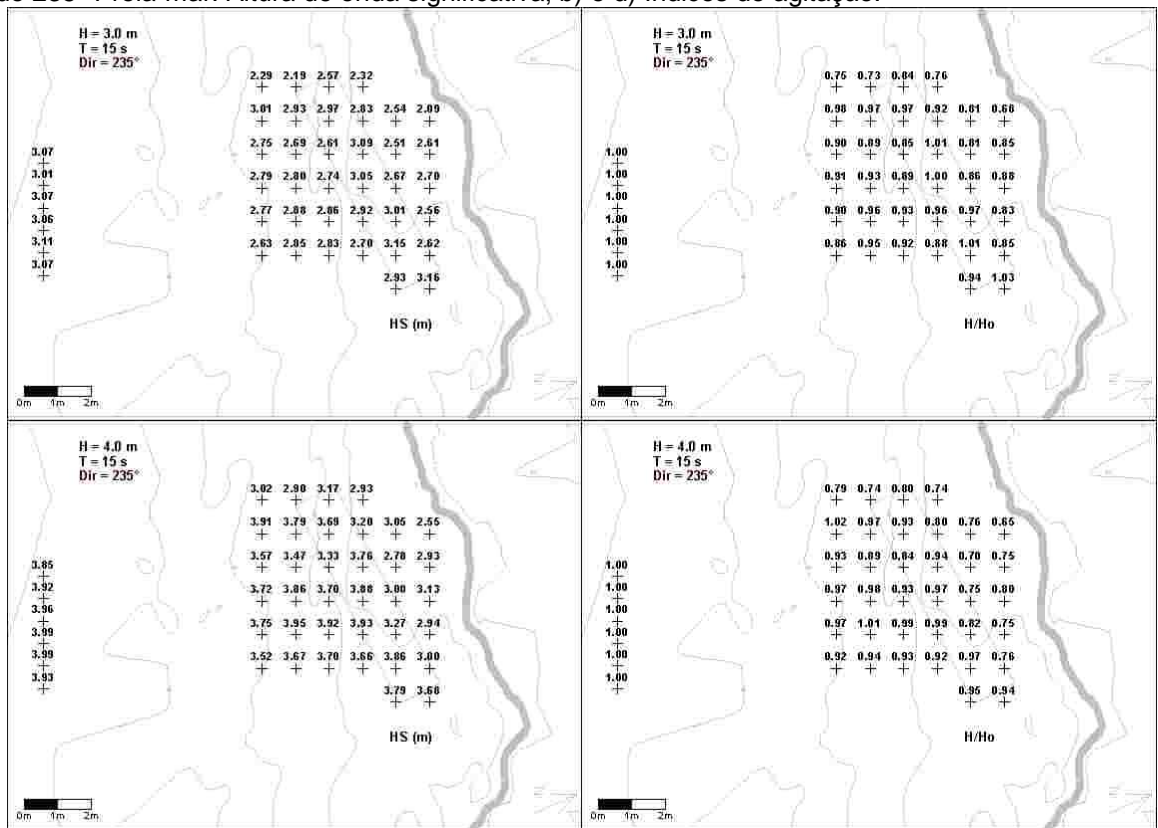


Figura AII.12 – Situação com recife. Onda incidente de T=15s H=3m e H=4m, direcção incidente de 235° Preia-mar. Altura de onda significativa; b) e d) Índices de agitação.