



MODELAÇÃO NUMÉRICA DO IMPACTO DOS ESPORÕES NA HIDRODINÂMICA COSTEIRA

^{1, 3}Rocha, M., ²Coelho, C. e ³Fortes, J.

¹Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

²Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e CESAM, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

³Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

m.rocha@ua.pt, ccoelho@ua.pt, jfortes@lneec.pt

RESUMO

Esta comunicação tem por objectivo a análise do desempenho do modelo COULWAVE na simulação da propagação de ondas na zona marítima da praia da Cornélia, na Costa da Caparica e a utilização deste modelo na avaliação do impacto da implantação de um esporão na hidrodinâmica costeira desta zona de estudo.

Assim, primeiramente aplicou-se o modelo COULWAVE para as condições de agitação incidente verificadas durante uma campanha de campo realizada na praia da Cornélia de 11 a 15 de Maio de 2010. Os resultados numéricos foram comparados com os dados de campo de alturas significativas de onda e velocidades horizontais. O modelo demonstrou um bom desempenho, com resultados particularmente promissores para as alturas de onda significativas medidas antes da rebentação.

Posteriormente, a partir da batimetria real da praia em questão, criaram-se diversos cenários associados à implantação de um esporão e às condições de agitação incidente, para avaliação da influência de cada um dos factores no impacto do esporão na hidrodinâmica costeira: (i) diferentes comprimentos do esporão, (ii) diferentes orientações do esporão, (iii) diferentes alturas significativas das ondas incidentes e (iv) diferentes níveis da superfície do mar. Verificou-se que a altura das ondas incidentes é o factor que adquire uma maior relevância no impacto do esporão na hidrodinâmica costeira (alturas significativas de onda e velocidade horizontal junto à costa), seguido do nível da superfície do mar, comprimento do esporão e, finalmente, da orientação do esporão.

1. Introdução

A zona costeira é um ambiente complexo e dinâmico, difícil de estudar e modelar. Um leque variado de processos induzem mudanças em diferentes escalas temporais e espaciais, desde os fenómenos de turbulência de pequena escala à erosão costeira de larga escala.

As ondas geradas pelo vento são consideradas o agente forçador dominante na hidro e morfodinâmica costeira. Nas águas pouco profundas da região costeira, a propagação das ondas em direcção à praia, envolve fenómenos não lineares complexos, tais como a refacção, difracção, rebentação e espraçamento da onda, que assumem uma importância fundamental na engenharia costeira. Como tal, a capacidade de descrever, simular e prever a propagação e rebentação das ondas, torna-se essencial para a compreensão da dinâmica da região costeira e zona de rebentação. Neste aspecto, os modelos numéricos constituem uma ferramenta poderosa, nomeadamente, os modelos não lineares do tipo Boussinesq. Com efeito, estes modelos baseados nas equações estendidas de Boussinesq permitem uma descrição adequada da evolução das ondas marítimas em zonas de profundidade variável, tendo em conta os efeitos de fenómenos como a refacção, difracção, rebentação, geração de harmónicas e interacções não lineares. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2002) As equações deste modelo foram deduzidas utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*), i.e., admitindo um dado perfil de velocidades para cada camada em que se divide a coluna de água. O número de camadas considerado contribui

para a precisão do modelo. O modelo fornece séries temporais de elevação da superfície livre e de velocidades horizontais. No entanto, a aplicação deste modelo a uma situação real deve ser sempre precedida por uma análise das condições de aplicação do modelo e, mais concretamente, pela calibração de certos parâmetros do modelo. Fenómenos de dissipação de energia por rebentação ou por atrito de fundo são incluídos no modelo através da adição de termos à equação original, dependentes de um conjunto de parâmetros que têm de ser calibrados para cada caso de estudo. Torna-se assim importante a calibração prévia dos parâmetros e uma caracterização do desempenho do modelo para os parâmetros escolhidos.

Para além da caracterização da propagação de ondas em zonas costeiras, um importante contributo da modelação numérica para a engenharia costeira é a análise comparativa de soluções de protecção costeira (por exemplo, esporões, quebra-mares, etc).

Os esporões são obras de engenharia costeira, perpendiculares à costa, e projectadas para retenção de sedimentos da deriva litoral, com o objectivo de atenuar a erosão em troços específicos do litoral. Após a sua construção, a linha de costa ajusta-se naturalmente à presença de uma barreira ao transporte sedimentar longitudinal, e após algum tempo a acreção determina um aumento da largura da praia a barlar da estrutura. A conservação da massa sedimentar resulta então na erosão e diminuição da largura da praia a sotamar (Basco, 2006).

A difracção das ondas produzida pela presença de um esporão diminui a energia das ondas na zona de sombra a sotamar da estrutura e conseqüentemente a sua altura e a velocidade das correntes induzidas. Na zona a sotamar do esporão, tendem a gerar-se complexos padrões de circulação de correntes, que transportam sedimentos longitudinalmente e em direcção ao largo, ao longo do lado abrigado da estrutura (Dean, 1978). A importância deste campo de velocidade depende de diversos factores, como a geometria do esporão, as condições de agitação incidentes e a variação do nível médio do mar ao longo do ciclo de maré (Basco, 2006). O impacto real dos esporões nas condições de agitação e campo de velocidades junto à costa é um tema ainda em estudo e a utilização de modelos não lineares do tipo Boussinesq assume-se como uma ferramenta importante nesta investigação.

Assim sendo, pretende-se neste trabalho apresentar um contributo para o conhecimento e modelação da hidrodinâmica costeira e do impacto dos esporões na altura significativa das ondas e velocidade horizontal junto à costa, utilizando para tal resultados do modelo numérico não linear de propagação de ondas, COULWAVE. Inicialmente, o modelo numérico COULWAVE é aplicado ao caso de estudo da praia da Cornélia na Costa da Caparica, e os seus resultados são comparados com os dados recolhidos durante uma campanha realizada nesta praia de modo a ser avaliado o desempenho do modelo e calibrados alguns dos parâmetros inerentes ao local em questão. Posteriormente, o modelo é aplicado ao estudo do impacto de um esporão na hidrodinâmica costeira, sendo considerados diferentes comprimentos e orientações do esporão e diferentes alturas significativas das ondas incidentes e níveis da superfície do mar.

No capítulo 2 deste trabalho, faz-se uma breve descrição da campanha de campo realizada, no capítulo 3 é apresentada a análise do desempenho do modelo COULWAVE para as condições de agitação verificadas durante a campanha de campo, e o capítulo 4 termina com a análise do impacto de um esporão nessa zona, sendo consideradas diferentes características do esporão e diferentes condições de agitação incidente e nível da superfície da água. O capítulo 5 é o das conclusões e aponta linhas de investigação futura.

2. Campanha de Campo na praia da Cornélia, Costa da Caparica

No âmbito do projecto BRISA (*Breaking waves and induced sand transport*), realizou-se uma campanha de campo, entre os dias 11 e 15 de Maio de 2010, na praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal (Fig. 1), tendo como principal objectivo a aquisição de dados hidrodinâmicos e morfológicos para futuros testes e validação de modelos numéricos. Além disso, esses dados contribuem para o conhecimento da rebentação das ondas e dinâmica sedimentar e da morfodinâmica específica da praia em estudo.



Fig. 1 - Local da campanha de campo do Projecto BRISA (Google Earth): a) Costa da Caparica e b) Praia da Cornélia.

Durante a campanha, foram instalados diversos instrumentos para a medição da elevação da superfície livre (*Pressure Transducers*, PT), da velocidade da corrente (correntómetro electromagnético, *Electromagnetic Current Meters*, ECM e medidor acústico de velocidades por efeito de Doppler, *Acoustic Doppler Velocimeters*, ADV), da turbidez e da concentração de partículas em suspensão (*Optical Backscatter Sensors*, OBS). Todos os instrumentos foram colocados durante uma baixa-mar e as suas posições calculadas a partir de um DGPS, georreferenciadas através de um sistema TRK-DGPS e sincronizadas com o Observatório Astronómico de Lisboa. Estes instrumentos foram posicionados aproximadamente ao longo de um mesmo perfil de praia, acoplados a estruturas em H (Fig. 2).

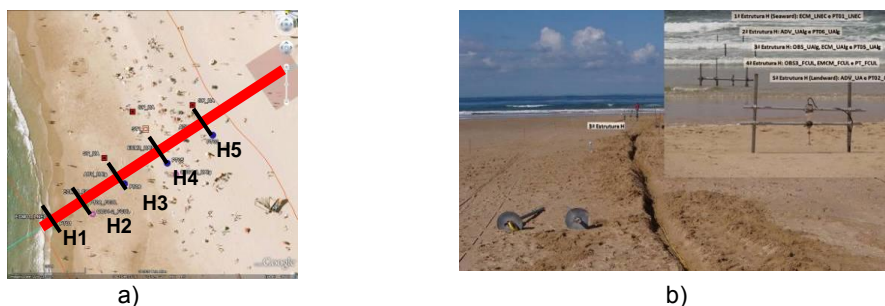


Fig. 2 – a) Localização do perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos (Google Earth) e b) Fotografia do perfil com os equipamentos e montagem, com localização das estruturas em H usadas na campanha (Bezerra e Ferreira, 2010).

Para além destes instrumentos, e a cerca de 7.6 m (ZH) de profundidade, foi colocada uma poita com um transdutor de pressão aproximadamente em frente ao perfil dos equipamentos colocados na face de praia, para medição da elevação da superfície livre em maiores profundidades.

Neste trabalho, são apenas consideradas as medições da elevação da superfície livre obtidas em três transdutores de pressão: um posicionado em águas mais profundas (7.6 m, referidos ao ZH) e dois mais próximos da costa, na zona de rebentação, e as medições de velocidade horizontal (componentes transversal e paralela à costa) medidas com um correntómetro electromagnético (ECM), localizado na zona de rebentação (Tabela 1).

Tabela 1 - Identificação, posição e frequência de aquisição dos instrumentos PT00, PT01, PT02 e ECM.

Estrutura	Identificação	Modelo	X (Easting)	Y (Northing)	Z (ZH)	Frequência de aquisição (Hz)
-	PT00	Infinity WH	-95847.090	-115311.000	-7.6	5
H1	PT01	Infinity WH	-95357.825	-114985.584	1.506	1 e 10
H1	ECM	Infinity ECM	-95357.492	-114985.802	1.549	10
H5	PT02	LevelTroll500	-95279.189	-114931.251	3.031	2

As medições foram efectuadas entre 12 e 15 de Maio de 2010, tendo sido obtidos dados para cinco ciclos de maré. No âmbito deste trabalho analisaram-se apenas os dados obtidos durante os ciclos de maré do dia 12-05, às 8:15, ao dia 14-05 às 20:30, com os transdutores PT01 e PT02 e o ECM, e durante os ciclos de maré do dia 12-05, às 8:15, ao dia 15-05 às 11:00, com o transdutor PT00.

Realizou-se um levantamento batimétrico da área da zona costeira em estudo, no dia 11 de Maio de 2010, durante a preia-mar diurna. Este levantamento foi feito ao longo de 19 perfis perpendiculares à linha de costa, com um espaçamento de 100 m entre si.

Para uma descrição mais detalhada da campanha de campo, ver Bezerra e Ferreira (2010), Moura *et al.* (2010) e Silva (2010).

3. Aplicação do Modelo COULWAVE ao Caso de Estudo

3.1. O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE (*Cornell University Long and Intermediate Wave Modelling Package*), desenvolvido por Lynett e Liu (2002), é um modelo 2D de diferenças finitas para a simulação da propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas por Wei *et al.* (1995) a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*), cada uma definida com um dado perfil vertical de velocidade. O desempenho do modelo depende então do número de camadas consideradas e a sua aplicabilidade pode estender-se a águas muito profundas, uma vez que apresenta características lineares até $kh \sim 8$ e um comportamento não-linear de 2^a ordem até $kh \sim 6$ (sendo k o número de onda e h a profundidade). Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

Seguindo o procedimento de Kennedy *et al.* (2000), são introduzidos termos adicionais nas equações, para serem simulados o atrito de fundo, a rebentação e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, são incluídos termos de profundidade dependentes do tempo para serem consideradas variações do perfil de fundo no tempo, devidas à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3^a ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4^a ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4^a ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efectuadas com uma precisão de 2^a ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby (1995) refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, são aplicados dois tipos de condições: reflexão e radiação. Para a reflexão é seguida a metodologia de Wei e Kirby (1995) e para a radiação ou condição de fronteira aberta, é utilizado o esquema de fronteira absorvente (*sponge layer*), de acordo com Kirby *et al.* (1998).

Os dados de entrada do modelo encontram-se descritos em Lynett e Liu (2002) e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador, bem como da posição da linha de rebentação.

3.2. Condições de simulação

As condições de agitação impostas ao modelo corresponderam a ondas regulares com características baseadas nos valores medidos pelo transdutor PT00 (Tabela 1) na praia da Cornélia, Costa da Caparica, durante o período de aquisição, entre 12 e 14 de Maio de 2010. Assumiu-se uma direcção de incidência das ondas perpendicular à costa, uma vez que os instrumentos no campo não permitiam o registo da direcção das ondas.

Para cada condição de onda incidente, definida pela altura significativa de onda e período significativo, nível de maré e profundidade na posição da fonte de onda, o modelo foi executado durante 300 s. Limitações computacionais impossibilitaram a corrida de todas as simulações durante períodos de tempo mais longos.

O domínio foi discretizado numa grelha $\Delta x = \Delta y \approx 2.0$ m, com 900 m na direcção x e 858 m na direcção y (Fig. 3). Esta grelha é criada pelo modelo com base num número mínimo de pontos por comprimentos de onda, definido como 30 nas simulações efectuadas, que depende do período de onda.

A batimetria considerada pela malha teve como base o levantamento batimétrico realizado no primeiro dia da campanha de campo. Além disso, foi adicionada ao domínio uma zona de profundidade constante, onde as ondas foram geradas, com o método da função-fonte (Wei *et al.*, 1995).

A fonte de geração foi colocada em $x = 100$ m. Foram consideradas condições fronteira de absorção em ambas as fronteiras abertas do domínio, com largura igual a metade do comprimento de onda e nas outras duas fronteiras foram definidas condições reflectivas.

Sendo $\zeta_t^{(l)} = A\sqrt{gH}$ (H a altura total da coluna de água e g a aceleração da gravidade) o parâmetro de rebentação relacionado com o início da rebentação, define-se $A=0.65$ para fundos de inclinação suave. No entanto, Chen *et al.* (2000) sugeriram um valor de 0.35 para praias com perfil barra-fossa, o caso da praia em estudo neste trabalho.

No presente trabalho, e uma vez que foram testados vários cenários que alteram o perfil de fundo da batimetria, e depois de várias tentativas de ajustamento do parâmetro, foi considerado um valor de 0.50 para permitir que o maior número de simulações possível fosse executado pelo modelo e que a rebentação das ondas fosse convenientemente simulada.

O tempo de simulação do modelo para cada condição de agitação foi de 300 s e os valores dos parâmetros não mencionados aqui foram definidos segundo o manual do modelo (Lynett e Liu, 2002).

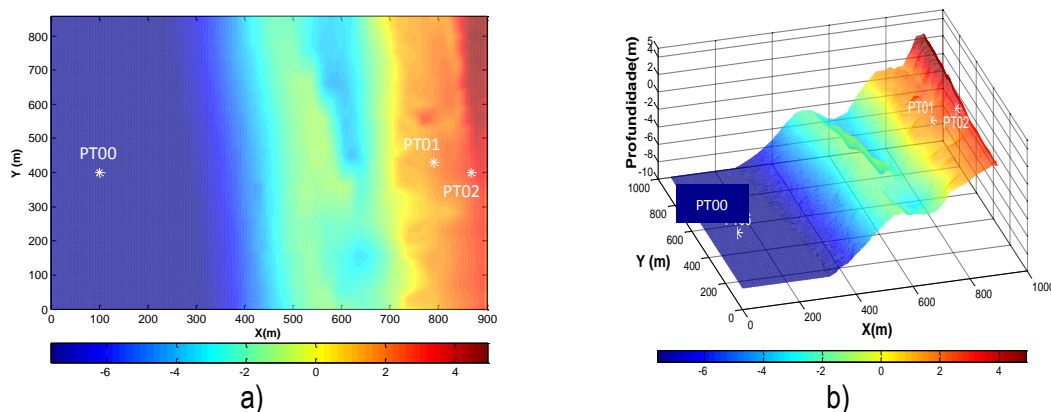


Fig. 3 - a) Representação em planta do domínio e batimetria reais; b) Representação 3D da batimetria do domínio. Os marcadores brancos assinalam os pontos de cálculo da malha correspondentes aos instrumentos PT00, PT01 e PT02 (respectivamente, do largo para a costa).

3.3. Comparação de resultados numéricos e dados de campo

Para análise do desempenho do modelo numérico, foram comparados nas posições PT00, PT01 e PT02: (i) os valores numéricos e medidos de alturas e períodos de onda significativos, para o período compreendido entre os dias 12 a 14 de Maio de 2010 e (ii) os parâmetros

estatísticos, nomeadamente o desvio (BIAS), o erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância (Eq. (1) - IC, Willmott *et al.* (1985)), para as alturas e os períodos de onda significativos, para o período de tempo em estudo.

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (1)$$

Foram também comparados, na posição do ECM, os valores numéricos e medidos das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática, no período de 12 a 14 de Maio de 2010, para as componentes transversal e longitudinal da velocidade horizontal e os mesmos parâmetros estatísticos calculados para os dados de agitação. Todas as análises se basearam em simulações de 300 s.

3.3.1. Elevação da superfície livre

Na Fig. 4 comparam-se os valores numéricos e os dados de campo, para a altura significativa, H_s , e o período significativo, T_s , das ondas, nas posições PT00, PT01 e PT02.

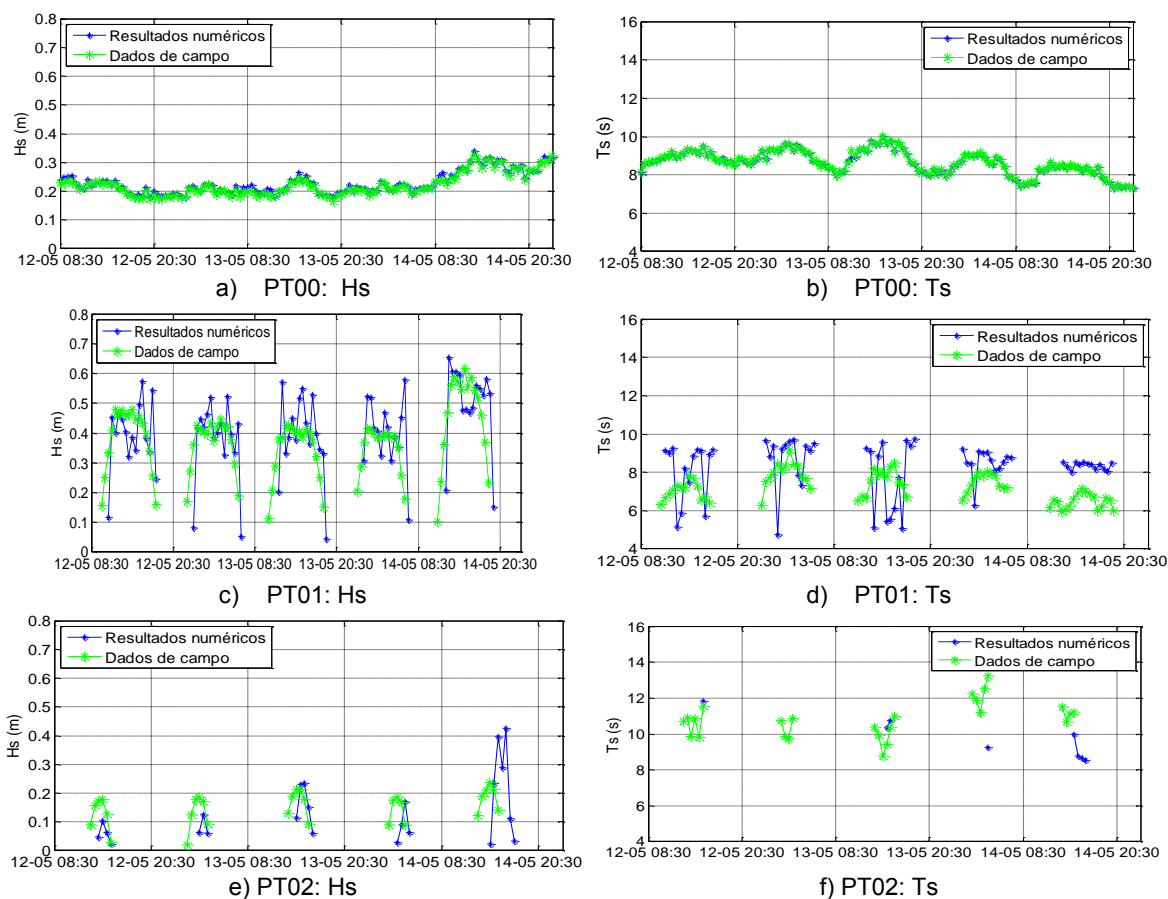


Fig. 4 - Comparação entre as medições nos sensores a) e b) PT00, c) e d) PT01 e e) e f) PT02 e os resultados obtidos com o COULWAVE para a altura e período significativos, para as respectivas posições dos sensores.

Para uma análise mais detalhada, a Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os valores de BIAS, RMSE e IC, para H_s e T_s , respectivamente, e para a posição de cada um dos três instrumentos.

Tabela 2 - Valores de BIAS, RMSE e IC para Hs nos sensores PT00, PT01 e PT02.

Sonda	BIAS (m)	RMSE (m)	IC
PT00	0.007	0.009	1.00
PT01	0.023	0.126	0.93
PT02	0.126	0.105	0.84

Tabela 3 - Valores de BIAS, RMSE e IC para Ts nos sensores PT00, PT01 e PT02.

Sonda	BIAS (s)	RMSE (s)	IC
PT00	-0.006	0.025	1.00
PT01	0.912	1.891	0.93
PT02	-	-	-

Nesta análise, os dados de campo e/ou resultados numéricos de Hs e Ts, correspondentes a períodos de baixa-mar, durante os quais os instrumentos se encontraram emersos, não foram considerados. Além disso, a análise estatística dos valores de Ts para a posição PT02 não é apresentada, devido ao número demasiado reduzido e pouco representativo de valores realistas a considerar. É também importante notar que a remoção dos valores irrealistas da amostra, particularmente relevante para PT01 e ainda mais para PT02, influencia o cálculo dos parâmetros estatísticos e como tal tende a mascarar o seu verdadeiro valor, especialmente no caso do índice de concordância. Uma análise detalhada da comparação dos resultados numéricos com os dados de campo pode ser encontrada em Rocha (2011).

Dos resultados apresentados, constata-se que o modelo é capaz de simular o andamento e ordem de grandeza dos valores medidos, particularmente para Hs. No caso dos valores de Ts, as diferenças absolutas são maiores.

Tanto para PT00 como para PT01, os resultados numéricos acompanham o andamento dos valores medidos, o que aponta para uma boa capacidade do modelo de simular a propagação das ondas em direcção à costa, especialmente antes da rebentação. Para locais mais acima no perfil de praia, como em PT02, onde as ondas já rebentaram, o modelo revela uma maior dificuldade em simular os dados reais. Estes factos são confirmados pelos valores estatísticos:

- Os valores de BIAS e RMSE são, em geral, inferiores no caso de Hs face a Ts o que consequentemente leva a índices de concordância superiores no caso de Hs face a Ts. Tal confirma a maior capacidade do modelo em simular as alturas de onda versus os períodos.
- Os menores valores de BIAS e RMSE no caso de PT00 e PT01 (com índices de concordância superiores a 0.9) face aos obtidos para PT02, confirmam também a maior capacidade do modelo em simular a propagação de ondas antes da rebentação do que após esta. Isto ainda é mais notório para o caso dos Ts.

As diferenças entre valores numéricos e medidos podem ser consequência de: (i) a direcção das ondas incidentes ter sido considerada transversal à batimetria (o que agrava as condições de agitação nos sensores junto à costa), e não corresponder à direcção real das ondas que efectivamente chegaram à praia da Cornélia durante o período da campanha. Esta limitação é uma consequência inevitável do facto de a direcção das ondas não ter sido medida durante a campanha; (ii) limitações inerentes ao modelo.

Particularmente, é importante notar que a aplicação do modelo em inclinações de fundo da ordem de 1/6 se torna muito exigente, pois as equações-base são integradas no pressuposto de que os fundos são de inclinação suave. Além disso, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de um termo de viscosidade turbulenta à equação original, que depende de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Apesar destes parâmetros deverem ser calibrados para cada caso de estudo e condição de agitação, foram no presente trabalho considerados constantes para todas as condições de agitação incidente (as quais variam ao longo do período total), limitando assim o desempenho do modelo.

3.3.2. Velocidade horizontal

Os gráficos da Fig. 5a e a Fig. 5b apresentam a comparação entre os valores medidos das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática, no ponto PT01, pelo correntómetro ECM e os valores simulados pelo modelo para esse mesmo ponto, respectivamente para as componentes transversal (U) e longitudinal (V) da velocidade horizontal. A componente U apresenta valores positivos na direcção do largo para a costa e a componente V, perpendicular a U, tem valores positivos sensivelmente na direcção NW-SE, seguindo a orientação do ECM.

É importante notar que os dados de campo são medidos perto da superfície e os valores numéricos são calculados a uma profundidade $z_1 = -0.531h$ (sendo h a profundidade da água), aproximadamente a meio da coluna de água, o que poderá explicar algumas das diferenças observadas entre dados de campo e resultados numéricos. Além disso, os valores de velocidade medidos e simulados durante períodos de baixa-mar tendem a apresentar valores demasiado elevados, como resultado da emersão do ECM. Estes valores foram excluídos da análise (o mesmo número de valores para ambas as componentes e para os dados de campo e resultados numéricos, no cálculo dos parâmetros estatísticos), apesar de alguns dos valores no início e fim de cada um dos cinco intervalos considerados para análise se encontrarem ainda desviados devido à emersão progressiva do ECM. Como tal, o cálculo dos valores de BIAS, RMSE e IC implicou a exclusão de diversos valores, o que reduz o tamanho da amostra e tende a mascarar os verdadeiros valores destes parâmetros estatísticos, que devem portanto ser considerados com cuidado.

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam a análise estatística com base nos valores medidos e simulados da velocidade horizontal.

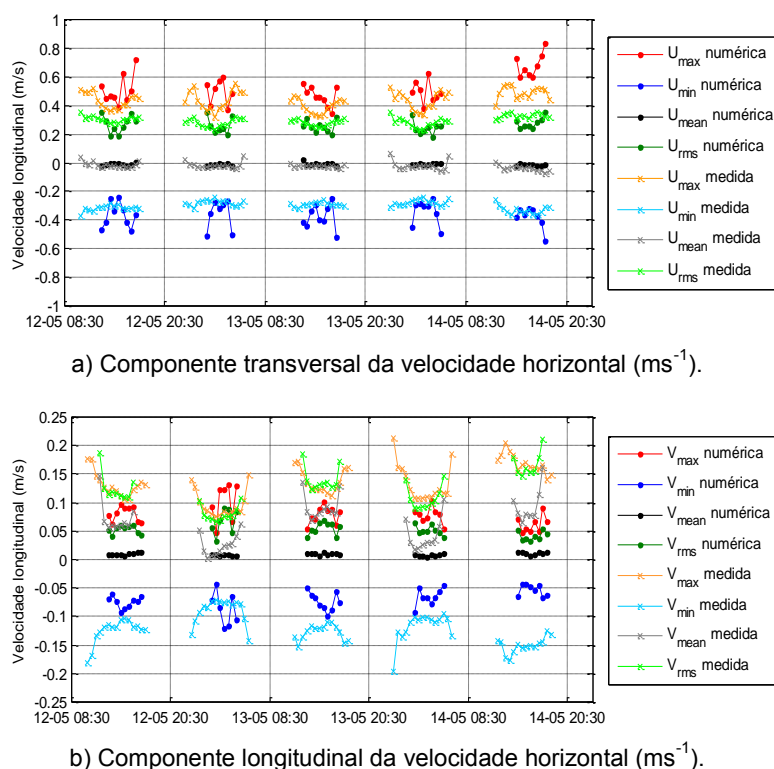


Fig. 5 - Comparação dos valores numéricos (pontos) e medidos (cruzes) das velocidades máxima, mínima, média e média quadrática (ms^{-1}) das componentes a) U e b) V, da velocidade horizontal.

Tabela 4 - Valores de BIAS, RMSE e IC de U_{max} , U_{min} , U_m e U_{rms} , no ponto PT01

Velocidade	BIAS (ms^{-1})	RMSE (ms^{-1})	IC
U_{max}	0.186	0.322	0.51
U_{min}	-0.119	0.169	0.49
U_m	0.010	0.036	0.71
U_{rms}	0.006	0.085	0.94

Tabela 5 - Valores de BIAS, RMSE e IC de V_{max} , V_{min} , V_m e V_{rms} , no ponto PT01

Velocidade	BIAS (ms^{-1})	RMSE (ms^{-1})	IC
V_{max}	-0.037	0.055	0.90
V_{min}	0.057	0.072	0.88
V_m	0.072	0.083	0.73
V_{rms}	-0.079	0.097	0.84

De uma forma geral, os resultados numéricos são capazes de representar bastante bem a ordem de magnitude dos valores medidos, mas demonstram uma maior dificuldade em descrever o seu andamento, exibindo os resultados numéricos maiores e mais frequentes oscilações entre intervalos de 30 minutos consecutivos.

Verifica-se que para os valores de U, o modelo consegue fornecer melhores estimativas dos valores médios (U_m e U_{rms}) do que dos valores extremos. Tal é confirmado pelos valores estatísticos: obtêm-se valores pequenos de BIAS e RMSE e índices de concordância superiores a 0.7, associados aos valores médios de U_m e U_{rms} , e valores bastante elevados de BIAS e RMSE e índices de concordância baixos para os valores extremos dessas variáveis (U_{max} e U_{min}). No caso de V, dada a pequena ordem de grandeza dos seus valores (face aos valores de U), não existe uma diferença significativa em qualquer um dos parâmetros estatísticos, nas estimativas dos valores médios ou extremos.

A sobre e subestimação dos valores medidos, respectivamente de U e V, estão provavelmente relacionadas com a direcção de propagação das ondas: o modelo foi forçado com ondas perpendiculares à costa, o que resulta em maiores valores de U e menores valores V, contrariamente à direcção real de propagação das ondas na praia, onde a sua obliquidade tenderá a resultar numa componente U mais fraca e numa componente V mais forte.

Uma análise mais detalhada do comportamento da velocidade horizontal durante o período de estudo e capacidade do modelo de simular os dados medidos pode ser encontrada em Rocha (2011).

4. Simulação do Impacto de um esporão na praia da Costa da Caparica

4.1. Introdução

Após a aplicação do modelo à praia em estudo, simulou-se a presença de um esporão no domínio, e avaliou-se o seu impacto nos valores de altura significativa das ondas e velocidade horizontal na zona costeira. Diferentes comprimentos e orientações do esporão e diferentes alturas significativas das ondas incidentes e níveis da superfície do mar foram posteriormente testados.

Os diferentes cenários incluem a variação: (i) do comprimento do esporão ($L=200$ m, $L=250$ m, $L=300$ m e $L=400$ m), (ii) da orientação do esporão relativamente à perpendicular à linha de costa ($\phi=10^\circ$, $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ e $\phi=30^\circ$), (iii) da altura significativa das ondas incidentes ($H_s=1.0$ m, $H_s=1.5$ m, $H_s=2.0$ m e $H_s=3.0$ m) e (iv) do nível da superfície do mar ($SSL=0.50$ m, $SSL=0.75$ m, $SSL=1.50$ m e $SSL=2.40$ m). Todos os cenários são comparados com um cenário de controlo, definido por um esporão de $L=200$ m e $\phi=10^\circ$, altura significativa da onda incidente $H_s=1.0$ m e nível da superfície do mar $SSL=0.50$ m.

Esta escolha de cenários pretendeu abordar um amplo leque de possibilidades frequentemente consideradas em situações reais e analisar a influência de quatro dos

parâmetros a serem considerados aquando da construção de um esporão. No entanto, esta escolha foi também condicionada por constrangimentos impostos pelas limitações do modelo, tais como a sua dificuldade em simular cenários em que a rebentação ocorre demasiado perto da cabeça do esporão. Nesses casos, observou-se que o modelo não foi capaz de correr as simulações até ao fim, o que será muito possivelmente uma consequência da variação abrupta de batimetria resultante da imposição do esporão na batimetria original. Verificou-se também que alturas de onda demasiado elevadas ou muito pequenas também constituem um problema para o modelo.

Em cada simulação o extremo do esporão foi posicionado o mais longe possível das fronteiras reflectivas (aproximadamente em $x=890$ m e $y=440$ m). O comprimento, L , foi medido da linha de costa em direcção ao largo, e o seu extremo em terra foi estendido até à fronteira direita do domínio. Todos os esporões foram definidos com uma largura no topo, W , de 6 m, com o coroamento localizado 5 m acima do ZH, h , e com um talude lateral com inclinação de $\frac{1}{2}$ (V/H) (Fig. 6).



Fig. 6 – Características do esporão: a) Comprimento e orientação e b) Altura e largura do coroamento e inclinação do talude lateral.

Para se avaliar o impacto do esporão em cada cenário, seleccionaram-se nove perfis, segundo x e y , entre as coordenadas de $x=400$ m e $x=800$ e $y=200$ m e $y=600$ m, com um espaçamento de 50 m entre perfis (Fig. 7).

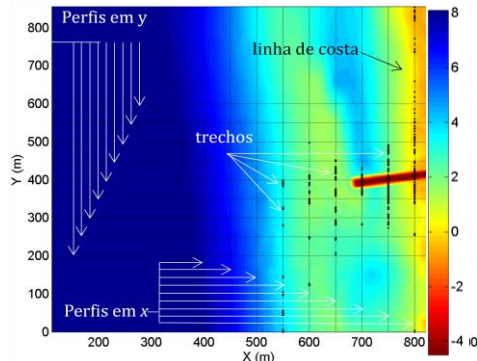


Fig. 7 – Representação esquemática dos perfis e trechos mencionados na análise. A linha de costa corresponde à cor que representa a profundidade zero (m) no mapa de cores.

Inicialmente compararam-se, no domínio completo, a altura significativa das ondas e zonas de rebentação, na análise de H_s , e o campo da velocidade horizontal. Posteriormente, definiram-se dois parâmetros calculados para os perfis, a serem comparados entre cenários: a extensão do impacto do esporão ao longo dos perfis, e a diferença média da altura significativa (ou velocidade) entre o cenário em análise e o de controlo. A mesma metodologia foi seguida para cada cenário considerado, sempre comparado com o cenário de controlo, Rocha (2011).

A extensão do impacto do esporão ao longo dos perfis consiste, primeiramente, no cálculo da percentagem de diferença relativa entre H_s (ou velocidade) no cenário em análise e no cenário de controlo, em cada ponto da grelha de cada perfil. Quando essa diferença é superior a um valor definido (dependendo do parâmetro em análise, L , ϕ , H_s ou SSL , pode ser 5%, 7.5% ou 10%), é considerada significativa. Esse valor é definido de forma a ser o menor valor abaixo do qual diferenças superiores se verificariam em demasiados pontos do domínio, perdendo portanto relevância para interpretação. Os pontos em que a diferença é então

considerada significativa são posteriormente assinalados a negro nos mapas de cores do domínio, evidenciando trechos dos perfis. A extensão total dos vários trechos de cada perfil é também calculada.

Para a avaliação da diferença média entre o cenário em análise e o cenário de controlo foi calculada simplesmente a diferença entre H_s (ou velocidade) no cenário em análise e no cenário de controlo, em cada ponto de cada perfil, tendo depois sido feita a média espacial dessa diferença ao longo de cada perfil, Rocha (2011).

4.2. Simulações de controlo

4.2.1. Alteração da altura significativa das ondas no domínio

Antes dos vários cenários serem analisados, avaliou-se apenas o efeito da implementação do esporão de controlo num domínio inicialmente sem esporão. A altura significativa de onda incidente foi considerada igual a 1.0 m e o nível da superfície do mar igual a 0.5 m. O comprimento do esporão imposto no domínio foi de 200 m, rodado 10° para o lado inferior da perpendicular à linha de costa.

Na Fig. 8 apresentam-se os resultados do modelo em termos da altura de onda significativa e das zonas de rebentação. A altura significativa das ondas no domínio encontra-se definida pela barra de cores. Uma vez que o interesse relativamente à análise da rebentação das ondas consiste em observar onde ocorre, as zonas azul-escuras correspondem a zonas onde nunca ocorre rebentação, e as cores progressivamente mais quentes indicam zonas onde acontece mais frequentemente rebentação de ondas ao longo do tempo de simulação.

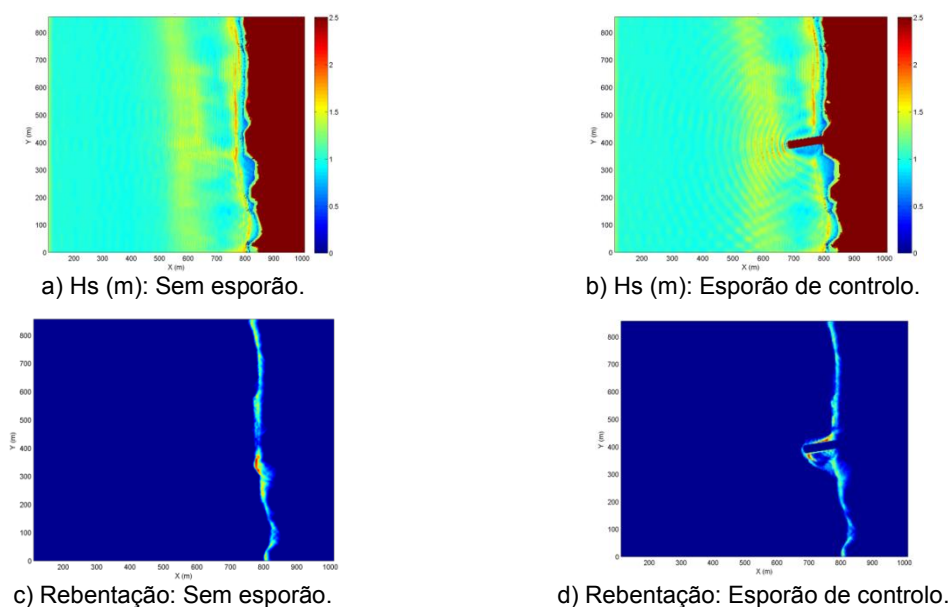
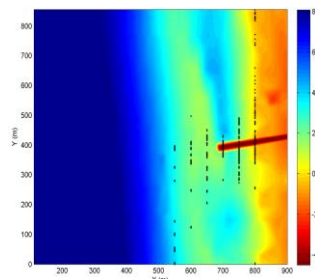


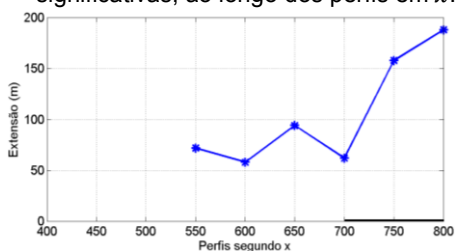
Fig. 8 – Valores de H_s (linha superior) e zonas de rebentação das ondas (linha inferior) no domínio, para a simulação sem esporão, respectivamente a) e c), e para simulação com o esporão de controlo, respectivamente b) e d).

Os mapas de cores da Fig. 9a e da Fig. 9b representam a profundidade no domínio, e os pontos a negro correspondem aos trechos dos perfis, respectivamente segundo x e segundo y , em que a percentagem de diferença relativa de H_s entre as simulações com e sem esporão foi considerada superior a 10%. Nos gráficos da Fig. 9c e da Fig. 9e é representada a extensão total (em metros) desses trechos, ao longo de cada perfil, e nos gráficos da Fig. 9d e da Fig. 9f é apresentada a média espacial da diferença entre H_s das simulações com e sem esporão, também para cada perfil em x e em y .

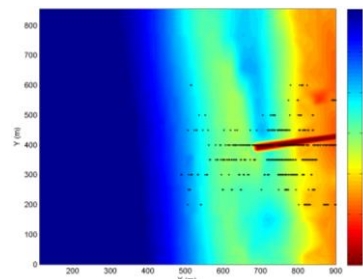
A partir da observação da Fig. 8 e da Fig. 9, verifica-se que as diferenças de H_s induzidas pelo esporão são mais relevantes na sua proximidade, sendo notório um aumento de H_s junto à cabeça do esporão, o que justifica a rebentação das ondas nessa zona. A linha de rebentação estende-se em direcção a sotamar do esporão (lado inferior do domínio), devido à orientação da estrutura. A presença do esporão gera um efeito de difracção na sua zona de sombra (no seu lado sotamar), junto à costa, onde as ondas já se encontram rebentadas e possuem um valor pequeno de H_s . A barlar do esporão, a reflexão é o efeito mais importante. Para a região exterior à cabeça do esporão o impacto em H_s é pouco significativo.



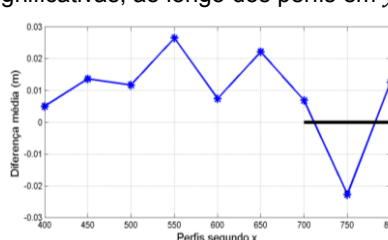
a) Trechos em que as diferenças de H_s são significativas, ao longo dos perfis em x .



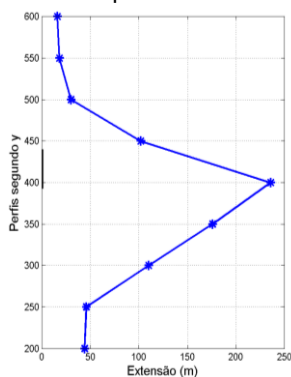
c) Extensão (m) do impacto do esporão, ao longo dos perfis em x .



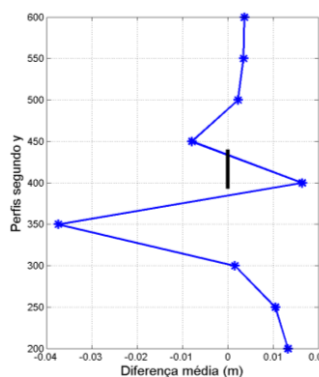
b) Trechos em que as diferenças de H_s são significativas, ao longo dos perfis em y .



d) Diferença média (m), ao longo dos perfis em x .



e) Extensão (m) do impacto do esporão ao longo dos perfis em y .



f) Diferença média (m), ao longo dos perfis em y .

Fig. 9 – Impacto do esporão em H_s : a) e b) Trechos em que as diferenças de H_s entre as simulações com e sem esporão são superiores a 10%, respectivamente ao longo dos perfis em x e em y . c) e e) Extensão dos referidos trechos, para cada perfil, respectivamente segundo x e y . Diferença média de H_s (entre as simulações com e sem esporão), para cada perfil, respectivamente segundo x e y .

4.2.2. Alteração da velocidade horizontal no domínio

Uma análise análoga à descrita para H_s foi efectuada para ambas as componentes da velocidade horizontal no domínio, Rocha (2011). Assim, analisaram-se as velocidades médias transversal (U) e longitudinal (V), em x e y , para os cenários com e sem esporão, de forma a permitir uma correcta análise da diferença média calculada ao longo dos perfis, uma vez que os valores positivos ou negativos da velocidade, estando associados à sua direcção, possuem um significado diferente.

Na Fig. 10 encontram-se representados os valores de H_s e o campo da velocidade horizontal média numa área limitada do domínio em torno do esporão ($180 \times 140 \text{ m}^2$), para uma observação mais detalhada das possíveis alterações induzidas pela presença do esporão.

A presença do esporão no domínio resulta em ondas com maior altura significativa e numa maior frequência de eventos de rebentação perto da sua cabeça, onde, no caso de um domínio sem esporão, nenhuma rebentação ocorreria. Associado a estes eventos, é notório um aumento da velocidade transversal, em direcção à costa, perto do esporão e na zona de rebentação, e um aumento da velocidade transversal, para longe da costa, em regiões mais distantes do esporão, onde a água que chegou à praia retorna para o largo.

Uma vez que o modelo simula a velocidade a meia altura da coluna de água, sem esporão, a velocidade transversal mais relevante junto à costa está associada a uma fraca corrente de retorno, e como tal, U aponta maioritariamente em direcção ao largo. No entanto, os valores absolutos mais elevados da velocidade acontecem na direcção da costa, associados à rebentação das ondas. O esporão introduz no domínio mais regiões onde os eventos de rebentação são relevantes, particularmente perto da sua cabeça, e como tal a velocidade transversal em direcção à costa tende a aumentar nestes locais, e em zonas mais distantes persiste a predominância da fraca corrente de retorno, em direcção ao largo. Em zonas onde não há rebentação de ondas, e uma vez que o modelo apenas simula o campo da velocidade associada à propagação de ondas (cujas direcções é imposta na fonte como sendo perpendicular à praia), a velocidade média é quase nula, correspondendo à oscilação das partículas de água em direcções opostas, à medida que as ondas se propagam.

Sendo que as ondas se propagam perpendicularmente à praia, o campo de velocidade inicial tem essencialmente uma direcção transversal. O esporão tende também a alterar este aspecto, principalmente ao condicionar a ocorrência de mais rebentação e fenómenos não lineares como a difracção e a reflexão, o que justifica as diferenças significativas entre os cenários com esporão e sem esporão registadas para a componente V , que se estendem a praticamente todo o domínio.

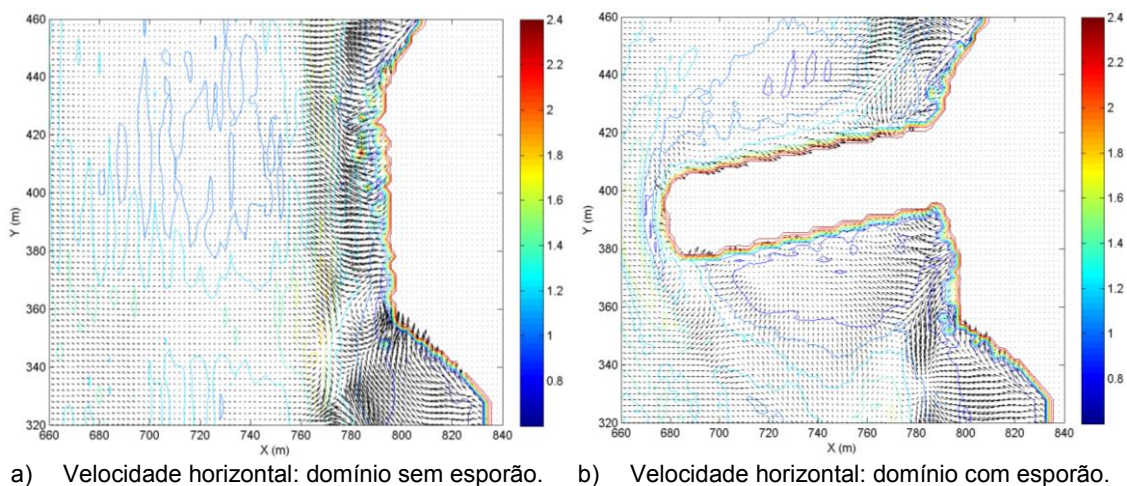


Fig. 10 – Campo de velocidade média numa área limitada ($180 \times 140 \text{ m}^2$) do domínio em torno do esporão: a) Domínio sem esporão e b) domínio com esporão. Os vectores da velocidade foram aumentados segundo um factor de $3X$ para melhor visualização. As linhas de cor representam H_s (m).

4.3. Outros cenários

Após a análise do impacto de um esporão simples na altura significativa das ondas no domínio e na velocidade horizontal, procedeu-se à análise da influência de alguns parâmetros geométricos do esporão (comprimento e orientação) e ambientais (altura significativa das ondas incidentes e nível da superfície do mar) nos valores de altura significativa das ondas no domínio em estudo. A metodologia de análise utilizada foi análoga à seguida para o impacto do esporão de controlo em H_s . Cada parâmetro foi alterado alternadamente, sendo os restantes

parâmetros mantidos de acordo com o cenário de controlo ($L=200$ m, $\phi=10^\circ$, $H_s=1.0$ m e $SSL=0.50$ m).

4.3.1. Diferentes comprimentos do esporão

Para avaliar a influência do comprimento do esporão no impacto em H_s , consideraram-se três novos comprimentos do esporão: $L=250$ m, $L=300$ m e $L=400$ m. As diferenças relativas de H_s entre os vários cenários e o cenário de controlo foram consideradas significativas quando superiores a 7.5%, visto não terem sido observadas no domínio diferenças superiores a 10%.

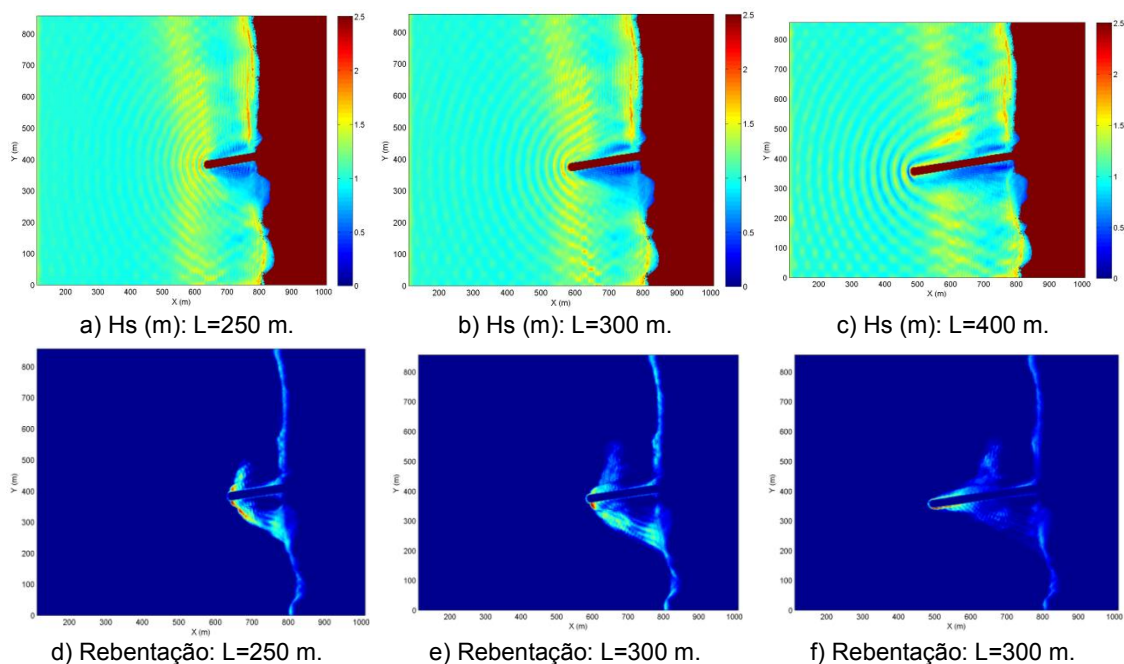


Fig. 11 - Mapas de cor de H_s (linha superior) e zonas de rebentação das ondas (linha inferior) no domínio, para $L=250$ m, respectivamente a) e d), $L=300$ m, b) e e) e $L=400$ m c) e f).

A partir da observação da Fig. 11 torna-se evidente que, à medida que o comprimento do esporão aumenta, o impacto do esporão na altura significativa no domínio se torna mais alargado, e fenómenos de reflexão nas fronteiras superior e inferior do domínio tendem a tornar-se mais relevantes. A zona de rebentação das ondas, mais concentrada junto à cabeça do esporão na simulação de controlo, estende-se em ambos os lados do esporão em direcção à costa, passando mesmo a ocorrer mais próximo da costa que a cabeça do esporão, no caso em que $L=400$ m. A zona de sombra a sotamar do esporão aumenta também, associada a uma diminuição de H_s .

De um modo geral, é clara uma tendência para o aumento do impacto do esporão em H_s à medida que o comprimento da estrutura aumenta, bem como uma ligeira mudança da zona afectada pelo esporão em direcção a sotamar. A extensão do impacto e a diferença média de H_s são superiores na vizinhança do esporão, particularmente até cerca de 100 m para cada lado deste.

4.3.2. Diferentes orientações do esporão

Após a avaliação da influência do comprimento do esporão no impacto em H_s , a influência da orientação é analisada. Consideraram-se, para tal, três orientações: $\phi = 15^\circ$, $\phi = 25^\circ$ e $\phi = 30^\circ$. As diferenças relativas de H_s entre os vários cenários e o cenário controlo foram consideradas significativas quando superiores a 5%, visto que não foram observadas no domínio diferenças superiores a 10% ou mesmo a 7.5%.

À medida que o ângulo entre esporão e a perpendicular à costa aumenta, aumenta também a zona de sombra a sotamar do esporão (Fig. 12). Além disso, a rebentação, inicialmente concentrada na região da cabeça do esporão, passa progressivamente a ocorrer contra o lado barlar do esporão, o que tenderá a aumentar a reflexão das ondas incidentes, que chegam aproximadamente com direcção perpendicular à costa.

A extensão das diferenças entre cada cenário e o cenário de controlo e a diferença média ao longo dos perfis em x e em y não seguem um padrão previsível em resposta ao aumento de ϕ , ao contrário do que acontece com os outros parâmetros. Este facto poderá ser uma consequência da alteração da orientação do esporão conduzir também a alterações significativas da posição onde termina o seu extremo mais distante da costa, das zonas de rebentação e dos padrões de difracção e reflexão. Um maior número de cenários com esporões de diversas orientações seria necessário para uma melhoria da análise do impacto deste parâmetro em H_s no domínio.

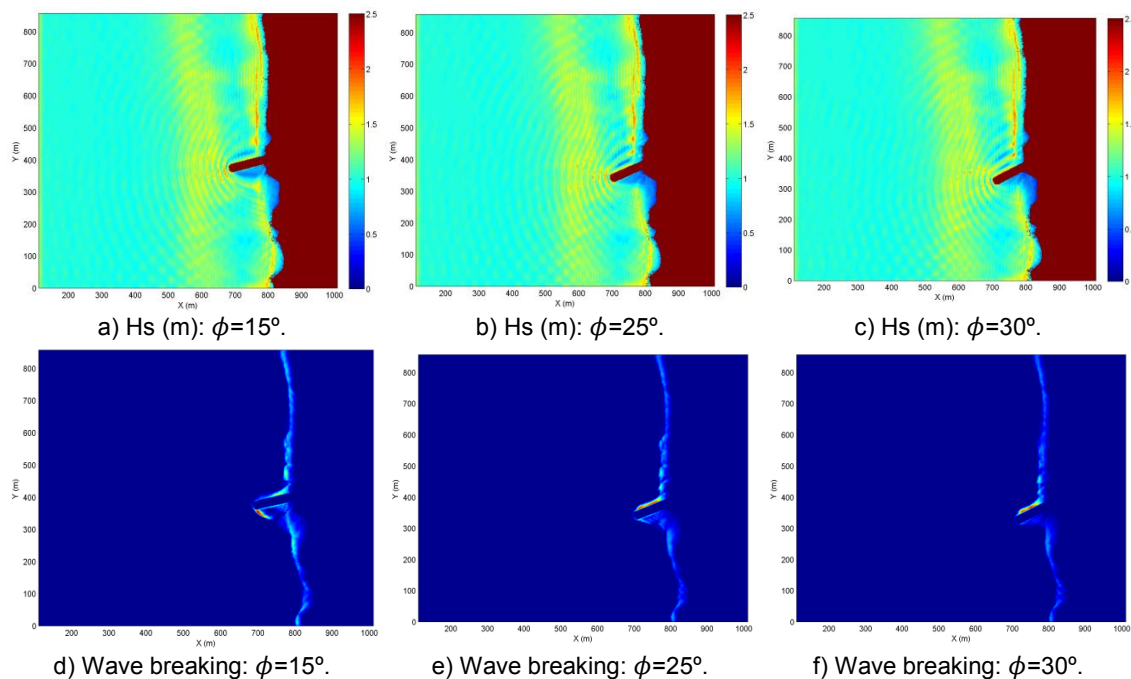


Fig. 12 - Mapas de cor de H_s (linha superior) e zonas de rebentação das ondas (linha inferior) no domínio, para $\phi=15^\circ$, respectivamente a) e d), $\phi=25^\circ$, b) e e) e $\phi=30^\circ$ c) e f).

4.3.3. Diferentes alturas significativas das ondas incidentes

Além de factores geométricos, também factores ambientais são importantes no impacto do esporão no domínio. Nesse sentido, para se testar a influência da altura significativa das ondas incidentes, consideraram-se três cenários com: $H_s=1.5$ m, $H_s=2.0$ m e $H_s=3.0$ m. As diferenças relativas de H_s entre os vários cenários e o cenário de controlo foram consideradas significativas quando superiores a 10%.

Numa primeira análise da Fig. 13, torna-se evidente que, para os cenários em que H_s é superior a 1.5 m, a zona de rebentação já não é influenciada pela presença do esporão, uma vez que as ondas, devido à sua maior altura, acabam por rebentar ainda antes de atingirem a cabeça do esporão. Os efeitos de difracção e reflexão provocados pelo esporão adquirem também uma menor relevância.

Em geral, há uma tendência marcada de aumento da altura significativa das ondas no domínio, em resposta ao aumento da altura significativa das ondas incidentes. Apesar do impacto do esporão diminuir com o aumento da altura de onda incidente, o seu efeito protector

continua a ser importante nas zonas do domínio mais próximas, em particular a sotamar do esporão, onde o aumento generalizado de H_s no domínio é atenuado.

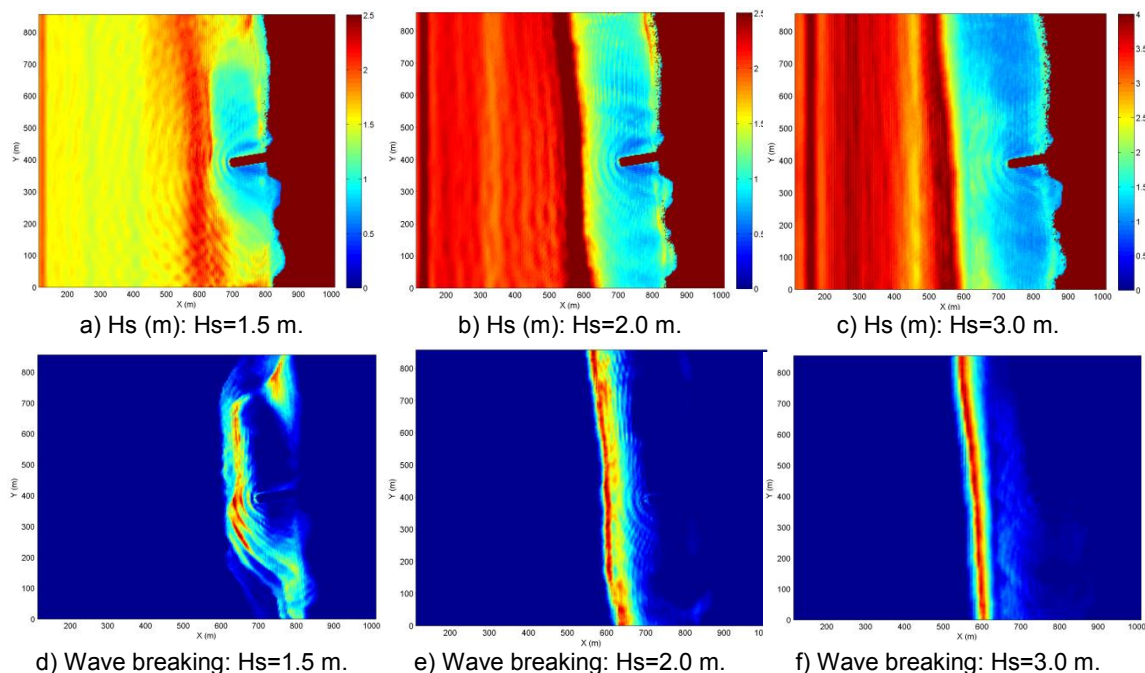


Fig. 13 - Mapas de cor de H_s (linha superior) e zonas de rebentação das ondas (linha inferior) no domínio, para $H_s=1.5$ m, respectivamente a) e d), $H_s=2.0$ m, b) e e) e $H_s=3.0$ m c) e f).

4.3.4. Diferentes níveis da superfície do mar

Outro factor ambiental importante a analisar é o nível da superfície do mar, intimamente associado à variação do nível de maré. Para avaliação da influência de diferentes níveis da superfície do mar, foram escolhidos três cenários diferentes para comparação com o cenário padrão: $SSL=0.75$ m, $SSL=1.50$ m e $SSL=2.40$ m. As diferenças relativas de H_s entre os vários cenários e o cenário de controlo foram consideradas significativas quando superiores a 10%.

Uma vez que a altura de onda incidente imposta nos três cenários foi de 1.0 m, a rebentação ocorre sempre entre a posição da linha de costa e a cabeça do esporão. No entanto, observa-se na Fig. 14 uma deslocação da zona de rebentação da cabeça do esporão para as zonas laterais, à medida que SSL aumenta. Por outro lado, quando o nível da superfície do mar é mais elevado, a linha de rebentação tende a encontrar-se a uma maior distância da linha de costa e a ser mais larga.

A influência da posição da barra submersa é também notória: as diferenças significativas de H_s no domínio, entre cada cenário e o cenário de controlo, estendem-se mais ao longo dos perfis longitudinais, localizados no seguimento da barra submersa. As duas excepções a este comportamento são os dois perfis mais próximos de terra, onde o aumento de SSL tem um impacto imediato, uma vez que condiciona a posição da própria linha de costa.

A diferença média entre cada cenário e o cenário padrão atinge valores mais negativos à medida que SSL aumenta, observando-se um decréscimo de H_s particularmente marcado para profundidades correspondentes à posição da barra submersa.

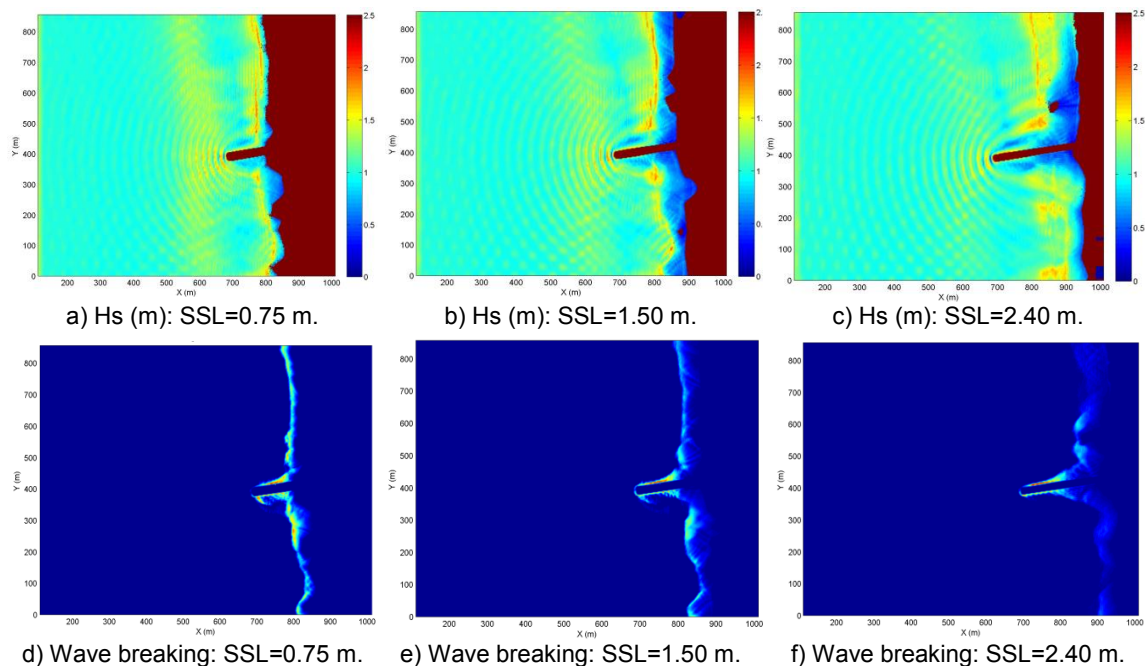
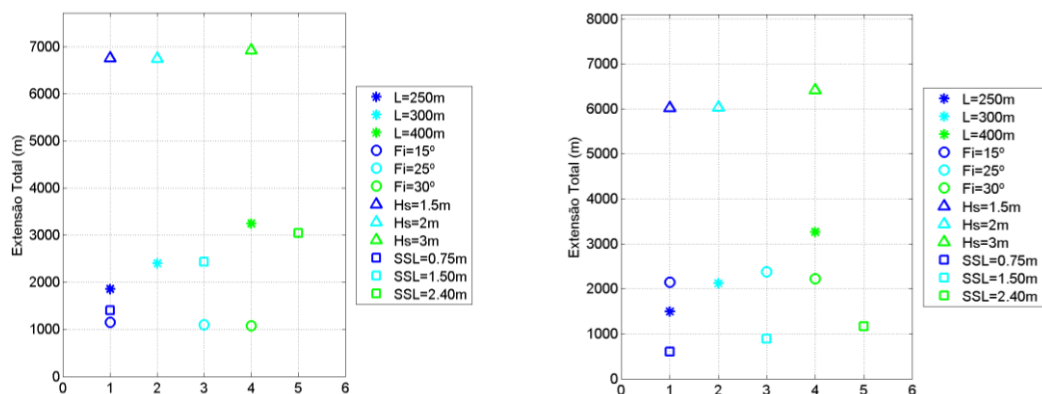


Fig. 14 - Mapas de cor de H_s (linha superior) e zonas de rebentação das ondas (linha inferior) no domínio, para $H_s=1.5$ m, respectivamente a) e d), $SSL=1.50$ m, b) e e) e $SSL=2.40$ m c) e f).

4.3.5. Impacto global dos vários parâmetros

Na Fig. 15, apresenta-se uma análise qualitativa da influência de cada um dos parâmetros estudados no impacto do esporão na hidrodinâmica costeira, em ambas as direcções longitudinal e transversal, respectivamente a) e b).

É importante lembrar que tanto os impactos da alteração de H_s incidente e de SSL foram calculados tendo em conta uma diferença relativa de alturas de 10%, enquanto o impacto da mudança de comprimento do esporão (L) apenas se revelou importante para diferenças a partir de 7.5% e para o caso da alteração de ϕ foi necessário considerar diferenças superiores a 5%. Como tal, à partida, os factores ambientais, H_s incidente e SSL , são os mais importantes para a avaliação do impacto do esporão na zona costeira, seguidos do comprimento do esporão e, por último, da sua orientação.



a) Extensão total do impacto do esporão ao longo dos perfis em x para cada um dos três cenários considerados para cada parâmetro.

b) Extensão total do impacto do esporão ao longo dos perfis em y , para cada um dos três cenários considerados para cada parâmetro.

Fig. 15 – Extensão total dos trechos dos vários perfis, respectivamente em x e y , onde as diferenças de H_s entre cada cenário e o cenário de controlo são superiores a um determinado valor limite (considerado para cada parâmetro).

O impacto da mudança de H_s da onda incidente estende-se mais ao domínio completo do que o impacto da alteração de qualquer outro parâmetro, sendo mais evidente ao longo de x (paralelamente à costa) do que y (transversalmente à costa).

O aumento de H_s da onda incidente, de um cenário para o seguinte, resulta também num aumento da extensão do impacto do esporão, mais evidente para o caso mais extremo considerado, em que $H_s=3$ m. O aumento de SSL tem uma influência significativamente menos importante que o aumento de H_s e revela-se mais importante nos perfis paralelos à costa.

Observa-se um aumento linear da extensão do impacto do esporão à medida que SSL aumenta, afastando-se progressivamente mais do cenário SSL de controlo, em que SSL se definiu como 0.50 m.

Apesar de assumirem uma menor relevância que as condições ambientais, as características intrínsecas do esporão também têm a sua influência no impacto do esporão na altura significativa das ondas no domínio. Primeiramente, e seguindo uma tendência bastante linear e semelhante em ambas as direcções (x e y), a alteração do comprimento do esporão provoca um impacto mais marcado, sendo significativas diferenças superiores a 7.5%. O parâmetro que exibe uma menor influência no impacto que o esporão exerce em H_s no domínio é a sua orientação, sendo apenas significativa para diferenças superiores a 5%, e não seguindo aparentemente nenhuma tendência regular. Estando a variação deste parâmetro associada a outras alterações, com a da posição da cabeça do esporão, ou a dos padrões de difracção e reflexão, torna-se particularmente difícil apurar, com o número limitado de cenários avaliados, qual a sua influência concreta no impacto do esporão.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Neste trabalho, aplicou-se primeiramente o modelo numérico COULWAVE ao caso de estudo da praia da Cornélia, na Costa da Caparica, para análise da propagação e rebentação das ondas. Numa fase posterior, analisou-se o impacto da presença de um esporão na batimetria original da zona em estudo, na altura significativa e na velocidade horizontal no domínio, e diversos cenários, com diferentes comprimentos e orientações do esporão e diferentes alturas significativas das ondas incidentes e níveis de superfície do mar foram explorados.

O modelo COULWAVE demonstrou ser bastante capaz de simular os dados de campo, particularmente os valores de H_s , sendo que para T_s as diferenças observadas entre valores de campo e numéricos foram superiores. Como seria esperado, à medida que a proximidade à costa aumenta, e os fenómenos não lineares assumem uma maior relevância, os resultados simulados pelo modelo tendem a divergir mais dos dados de campo, especialmente após a rebentação das ondas.

A ordem de magnitude da velocidade horizontal (máxima, mínima, média e média quadrática, em ambas as direcções paralela e transversal à costa) é bem representada pelo modelo, simulando de forma razoável os valores médios da velocidade. Em contrapartida, o modelo demonstrou ser menos capaz de descrever os valores máximos e mínimos dos dados de velocidade, exibindo os resultados numéricos maior oscilação entre intervalos de 30 minutos consecutivos.

Na avaliação do impacto do esporão na hidrodinâmica da zona costeira, os factores ambientais, altura significativa das ondas incidentes, H_s , e nível da superfície do mar, SSL, são significativamente mais importantes, seguidos dos factores geométricos, o comprimento do esporão, L , e a sua orientação, ϕ , por último. A utilização do modelo COULWAVE facilitou, sem dúvida, a comparação de diferentes cenários de forma rápida e expedita e com resultados interessantes.

Para ultrapassar algumas das limitações deste trabalho, sugerem-se em seguida possíveis desenvolvimentos futuros.



Fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de termos de viscosidade turbulenta às equações originais, os quais dependem de um conjunto de parâmetros relacionados com o começo, duração e término da rebentação. Estes parâmetros deveriam ser calibrados individualmente para cada caso de estudo e condição de agitação imposta, mas foram neste trabalho assumidos como constantes em todos os intervalos de 30 min simulados. Um estudo da sensibilidade do modelo a estes parâmetros deveria ser considerado.

Seria também importante explorar a influência da direcção das ondas incidentes, definindo outras direcções além da perpendicular à costa e impor condições de agitação irregulares, para uma maior aproximação à realidade.

Quando as diferenças entre cada cenário e o cenário de controlo foram calculadas, um valor absoluto foi assumido, e apenas a alteração de H_s foi analisada, sem ter sido especificamente escrutinado se essa alteração era positiva (aumento de H_s) ou negativa (diminuição de H_s). Prosseguir com esta análise poderia ajudar a compreender a origem das alterações em cada região do domínio.

Acima de tudo, seria interessante estender o estudo do impacto do esporão em diferentes cenários também ao campo da velocidade horizontal e observar o impacto das alterações de H_s e das velocidades horizontais nos diferentes cenários, no transporte sedimentar junto à costa, e posteriormente modelar a variação da posição da linha de costa em função da alteração da hidrodinâmica e, em particular, da corrente de deriva litoral.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projecto BRISA - PTDC/ECM/67411/2006.

Referências

- Basco, D. R. (2006). Shore Protection Projects. *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC. 59-76.
- Bezerra, M. e Ferreira, O. (2010). Relatório de campo – Universidade do Algarve. Projecto BRISA - Campanha da Costa da Caparica (Praia da Saúde) (11 a 15 de Maio de 2010).
- Chen, Q., Kirby, J. T., Dalrymple, R. A., Kennedy, A. B., Chawla, A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **126**: 48-56.
- Dean, R. G. (1978). Coastal structures and their interaction with the shoreline. *Application of Stochastic Processes in Sediment Transport*. Kikkaua, H. W. S. a. H., Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Kennedy, A., Chen, Q., Kirby, J., Dalrymple, R. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I: 1D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **126** (1): 39-47.
- 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 for Applied Coastal Research, University of Delaware. 80 pp.
- Lynett, P. e Liu, P. (2002). Modelling wave generation, evolution and interaction with depth-integrated, dispersive wave equations, *COULWAVE Code Manual*. Cornell University Long and Intermediate Wave Modelling Package.
- Moura, T., Fortes, J., Capitão, R., Sancho, F. (2010). Relatório da Campanha BRISA II, Costa da Caparica (11 a 15 de Maio de 2010) - LNEC.
- Rocha, M. (2011). Numerical modeling of groin impact on nearshore hydrodynamics. MSc Thesis, Physics Department, Universidade de Aveiro. 60 pp.
- Silva, P. (2010). Relatório da campanha BRISA realizada na Costa da Caparica (praia da Cornélia) - Universidade de Aveiro.



- Wei, G. e Kirby, J. (1995). A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **120**: 251-261.
- 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.
- Willmott, C., Ackleson, S., Davis, R., Feddema, J., Klink, K., Legates, D., O'Donnell, J., Rowe, C. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, **90** (C5): 8995-9005.