



APLICAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO A EQUAÇÕES DE BOUSSINESQ PARA O PORTO DE PÓVOA DE VARZIM

A. Mazzolari^{a,*}, A. Trigo Teixeira^b

^a Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa.

^b Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa.

A Marina situada no Porto da Póvoa de Varzim está sujeita a níveis de agitação que excedem frequentemente os valores recomendados pela PIANC (PIANC, 1997). Neste estudo é aplicado o modelo de ondas Bouss2D, baseado na solução das equações de Boussinesq e num esquema numérico de diferenças finitas para calcular as condições de agitação no porto para diferentes hipóteses de temporais ao largo. É feita uma análise de sensibilidade preliminar tendo em vista determinar a variabilidade dos resultados em função de vários parâmetros físicos e computacionais do modelo. As estatísticas da onda calculadas para o interior do porto são então comparadas com os resultados obtidos com um outro modelo que tem por base a equação do declive suave "mild slope equation" (L. Pipa, 2008). As discrepâncias que podem ser atribuídas aos diferentes métodos de resolução numérica mostram que não é suficiente a escolha de valores para os parâmetros com base na literatura da especialidade, mas que dados para a calibração e validação devem fazer parte do estabelecimento do modelo. Por fim, o modelo foi utilizado para testar um novo "layout", que considera a construção de obras adicionais, tendo em vista melhorar as condições de abrigo da Marina.

Palavras chave: Modelos de Boussinesq, equações de declive suave, método das diferenças finitas, análise de sensibilidade.

Autor para correspondência: Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa. Tel: +351 218418129. Email: andrea8mazzo@virgilio.it

1. Introdução

O porto da Póvoa de Varzim localiza-se na costa norte de Portugal. A bacia portuária é abrigada por dois quebramares: o quebramar norte com cerca de 900m de comprimento e o quebramar sul, enraizado na zona das Caxinas, que funciona como contra molhe (Figura 1). O porto alberga uma zona de pesca por trás do molhe norte onde se incluem várias infraestruturas como: cais, passadiços e lota. Na parte sul da bacia portuária existe uma zona dedicada ao recreio náutico, que inclui passadiços de amarração, grade de marés, rampa e edifícios de apoio em terra e que é conhecida por Marina da Póvoa. A Marina está sujeita a agitação que excede os valores recomendados pela PIANC, que são da ordem dos 20-30 cm para a altura de onda significativa referida a embarcações até 18m de comprimento (PIANC, 1997), quando ocorrem eventos muito energéticos, principalmente durante o período de Inverno.

Tendo em vista compreender o modo com a agitação penetra no interior da Marina, foi realizado um novo estudo com um modelo que utiliza equações do tipo Boussinesq, o SMS Bouss2D. Os modelos que recorrem às equações de Boussinesq têm um grande campo de aplicação na prática da engenharia costeira sempre que está em causa a interacção onda-estrutura. Muitos destes estudos usam também dados de campo e resultados de modelos físicos tendo em vista estabelecer a validade do modelo numérico. No presente caso, dado que não se dispunha de medições de agitação no interior do porto, o estudo limita-se ao

estabelecimento do modelo e à análise dos resultados, ficando para uma fase posterior a calibração e verificação, após a obtenção de dados de campo.



Figura 1 – Vista de satélite do Porto da Póvoa de Varzim.

Os valores excessivos da altura de onda observados no interior da Marina conduziram ao estudo de um novo “layout” para o porto, em que um quebramar destacado foi acrescentado pelo interior tendo em vista a melhoria das condições de abrigo. Os resultados do modelo contribuem para o estudo da viabilidade de uma solução deste tipo. Já anteriormente o problema da melhoria das condições de abrigo tinha sido equacionado (L. Pipa, 2008), usando para o efeito o modelo CGWAVE, baseado nas equações de declive suave, e comparando diferentes soluções de obras a realizar pelo exterior e pelo interior do porto. No presente estudo, desenvolve-se a melhor solução encontrada anteriormente, que é testada para as mesmas condições espectrais na fronteira exterior e níveis de maré.

As simulações realizadas com modelo CGWAVE ofereceram uma oportunidade de comparação com os resultados do modelo Bouss2D, analisando-se as potenciais divergências no cálculo da agitação, no mesmo porto, que dois modelos numéricos com equações de base e esquemas numéricos diferentes podem fornecer.

2. Modelos Numéricos

O conhecimento das condições hidrodinâmicas locais constitui um pré-requisito para a implementação de projectos de engenharia costeira e portuária. Existe hoje um conjunto de ferramentas que são os modelos numéricos, que podem diferir entre si pelas hipóteses de base que consideram, pelas formulações analíticas e pelos esquemas numéricos que utilizam. Neste estudo analisa-se a aplicação do modelo Bouss2D, que utiliza equações do tipo Boussinesq, à propagação e penetração de agitação no Porto da Póvoa de Varzim.

Os modelos baseados nas equações do tipo Boussinesq são indicados para a simulação dos processos altamente não lineares que ocorrem em águas pouco profundas (empolamento, refração, difração, rebentação, dispersão de frequência,...) como os que se observam em presença de batimetria complexa, em embocaduras, nas entradas de portos ou na proximidade de estruturas costeiras. Entre estes fenómenos está a capacidade do modelo para descrever as transformações que a onda sofre na presença de entradas portuárias complexas (Schröter et al., 1995).

O modelo Bouss2D é baseado na solução no tempo usando um esquema de diferenças finitas da extensão de uma equação do tipo Boussinesq a águas mais profundas, que incluem um termo para ter em conta o atrito de fundo e a existência de estruturas porosas. Esta aproximação consegue fazer com que o modelo se aplique a águas mais profundas (Nwogu, 1993, 1996), ultrapassando uma das limitações principais das equações que na sua forma clássica eram válidas para profundidades relativas de até 0.16 (Peregrine, 1967).

Por outro lado, o modelo CGWAVE (Demirbilek e Panchang, 1998) é baseado na equação de declive suave, resolvida pelo método dos elementos finitos. É utilizada uma malha de cálculo constituída por elementos triangulares lineares de tamanho variável de acordo com o comprimento de onda. Este modelo simula a propagação e transformação da onda devido à refração, difração, rebentação e atrito de fundo em geometrias complexas junto à costa, que tenham uma inclinação máxima de 1:3. Uma das limitações deste modelo é a adopção da relação de dispersão linear, contrariamente ao que acontece nos modelos do tipo Boussinesq.

3. Setup do modelo Bouss2D

O modelo está estruturado numa série de malhas cartesianas sobrepostas; cada uma delas contém informação relativa a um conjunto de dados de entrada: a batimetria e a localização das obras que definem o contorno portuário, as camadas de amortecimento/reflexão, a posição do gerador de ondas e a localização das estruturas porosas.

A batimetria foi obtida a partir de dois levantamentos diferentes; o primeiro de 1990 que inclui a entrada do porto e zonas adjacentes do lado do mar; o segundo de 2006 que cobre a totalidade da bacia portuária. Estes dois levantamentos foram complementados com sondas digitalizadas da carta hidrográfica n. 24201 de Julho de 1999 do Instituto Hidrográfico até à batimétrica -40.

Camadas completamente amortecedoras foram incluídas na fronteira lateral do “tanque numérico” e na fronteira mais ao largo para evitar que haja reflexão para dentro do domínio por ondas que viajam no sentido de tentar atravessar esta fronteira. A linha de costa foi dividida num conjunto de camadas absorventes caracterizadas por um coeficiente que está relacionado com a capacidade de absorção e reflexão das estruturas (Figura 2). Cada camada amortecedora é definida pela sua posição na malha de cálculo, um coeficiente de amortecimento μ_{nd} e uma largura w determinada com base no critério definido na Figura 3 (Demirbilek e Nwogu, 2001).



Figura 2 – Localização das camadas amortecedoras nas fronteiras do domínio de cálculo (esquerda) e pormenor do porto (direita).

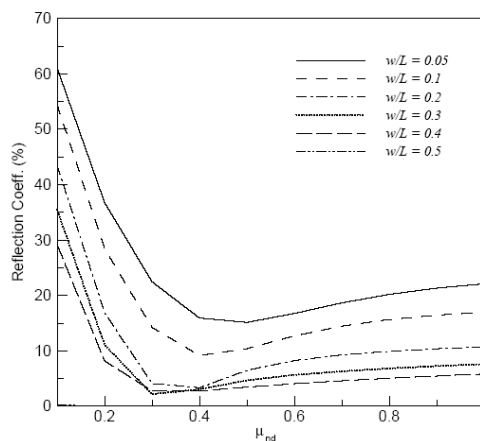


Figura 3 – Coeficiente de reflexão (ordenadas) e coeficiente de amortecimento (abscissas) para diferentes valores da largura da camada amortecedora e do comprimento de onda.

A figura anterior está relacionada com testes numéricos realizados para avaliar a taxa de absorção e reflexão para diferentes quocientes w/L , onde w é a largura da camada de amortecimento e L o comprimento de onda. Estes valores foram obtidos para incidências de onda ortogonais. Dado um coeficiente de reflexão χ , o utilizador selecciona para um valor de w/L , o coeficiente de amortecimento a utilizar no modelo. Neste caso, os coeficientes de reflexão para os diferentes tipos de estruturas foram obtidos de Hartwig (2005).

Tabela 1: Parâmetros seleccionados para as camadas amortecedoras.

<i>Estrutura costeira</i>	χ (adim.)	μ_{nd} (adim.)	w (m)
Praia arenosa (Sandy beach)	0,10	1.0	20
Talude suave (Mild slope revetment)	0,25	0.15	15
Retenção marginal (Retention works)	0,25	0.15	20
Enrocamento (Rip-rap)	0,25	0.15	20
Tetrápodos	0,33	0.1	25
Parede vertical (Vertical wall)	0,90	0	10

Três sondas numéricas foram localizadas no interior do porto para registar as séries temporais da altura de onda em pontos estratégicos (Figura 4). A Sonda A está na zona da Marina, a Sonda B na zona do porto de pesca perto do cais vertical e a Sonda C na zona intermédia mais exposta à agitação entre a Marina e a zona da pesca.

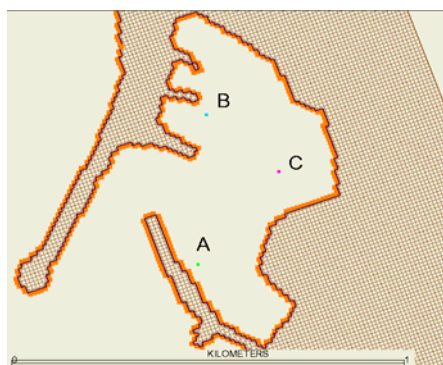


Figura 4 – Localização das sondas numéricas no interior do porto.

Tabela 2 : Coordenadas das Sondas

Sonda	X (m)*	Y (m)*
A	147019.5	489292.6
B	147040.0	489703.0
C	147223.7	489542.8

*= Coordenadas do Exército.

4. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem em vista estudar a variação da resposta do modelo à variação dos parâmetros de entrada. Analiticamente, dada uma relação do tipo M entre um conjunto de variáveis de entrada temporais e espaciais $X(\bar{x}, t)$ e parâmetros \bar{p} , e um termo dependente $Y(\bar{x}, t, \bar{p})$ na forma:

$$Y(\bar{x}, t, \bar{p}) = M(X(\bar{x}, t), \bar{p}) \quad (1)$$

a análise de sensibilidade corresponde ao cálculo da expressão

$$\left. \frac{dY(\bar{x}, t, \bar{p})}{dp} \right|_{p^*} \quad (2)$$

onde $p^* \in \bar{p}$ é um parâmetro. Para verificar o efeito que cada um dos parâmetros por si só tem no resultado, foi seguida a técnica “One-parameter-At-a-Time” (OAT). Os parâmetros investigados foram: a posição da fronteira oceânica, o tamanho da malha do modelo, a rugosidade de fundo e os coeficientes de amortecimento.

Posição da Fronteira Oceânica

Para verificar a dependência dos resultados do modelo na posição da fronteira oceânica foram realizadas seis simulações, fazendo variar a posição do gerador de ondas. O tamanho da célula da malha quadrada de diferenças finitas é de 10 m, as ondas são regulares provenientes da direcção W-20°-S com um período de 14 s e uma altura ao largo de 5 m. A duração da série temporal é de 750s para um período total de simulação de 1500s, enquanto o coeficiente de Chézy foi fixado em 30 (valor por omissão). Todos os geradores de ondas estão colocados em águas pouco profundas.

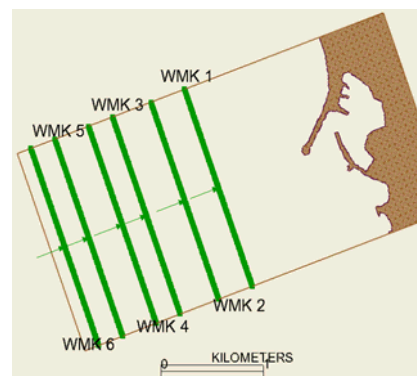
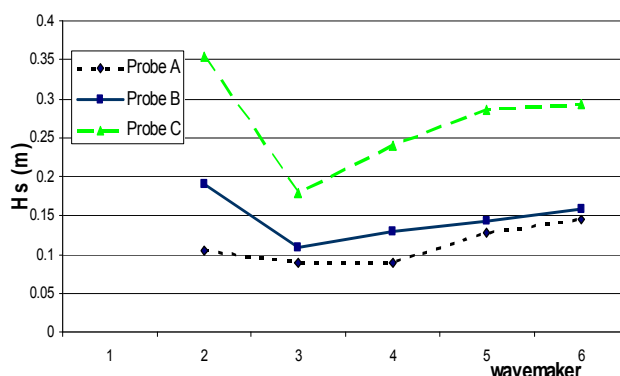


Figura 5 – Altura de onda significativa para as três sondas em função da posição do gerador de ondas (esquerda) e localização dos geradores de ondas (direita). $H_0=5$ m.

A corrida para a localização do gerador mais próxima da entrada do porto não pode ser concluída devido a instabilidade numérica. Aparentemente a altura de onda de 5 m imposta nesta localização gera instabilidade ao ser transferida para o regime não linear das águas pouco profundas. A altura de onda significativa apresenta um mínimo na localização das três sondas para o gerador na posição 3, adquirindo depois um comportamento “quase” assintótico à medida que o gerador caminha para águas mais profundas. Este resultado sugere que os resultados do modelo serão menos dependentes da posição da fronteira à medida que esta se desloca para o largo. Contudo, por limitações que têm que ser impostas ao tamanho e finura da malha de cálculo o limite será uma distância da ordem dos 4 a 5 km da linha de costa.

Tamanho da célula de cálculo

O modelo Bouss2D utiliza o método das diferenças finitas e como tal uma malha de cálculo regular e estruturada de elementos rectangulares. Uma série de simulações foi realizada para ver como o tamanho da célula influencia os resultados do modelo. Em todas as simulações foram utilizadas ondas regulares provenientes de W-20°-S com um período de 14 s e 3 m de altura. O coeficiente de Chézy tem um valor de 30 (valor por omissão). O gerador de ondas está na posição 4 como se mostra na Figura 5 (aproximadamente a 1950m da entrada do porto), enquanto os coeficientes de amortecimento são os apresentados na Tabela 1. Para efeito da presente análise, a altura de onda é representada ao longo dos três alinhamentos assinalados na Figura 6.

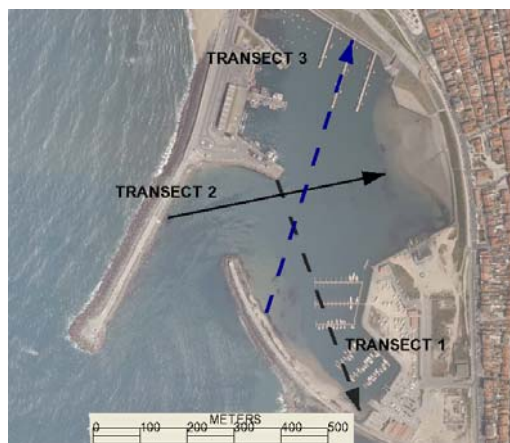


Figura 6 – Localização dos três alinhamentos de referência.

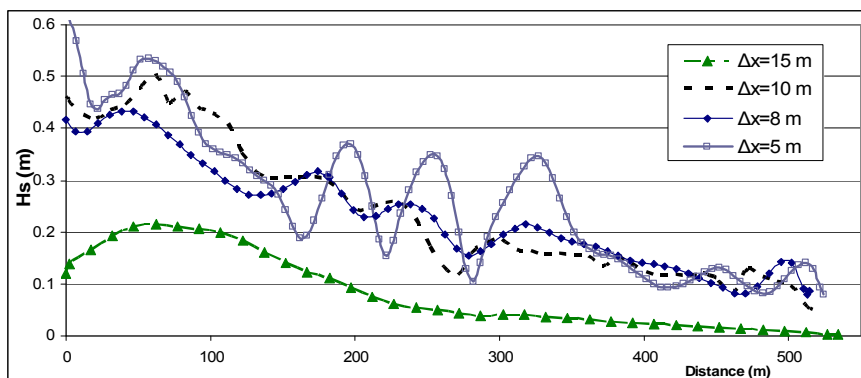


Figura 7 – Altura de onda significativa calculada ao longo do alinhamento 1 para resoluções diferentes da malha.

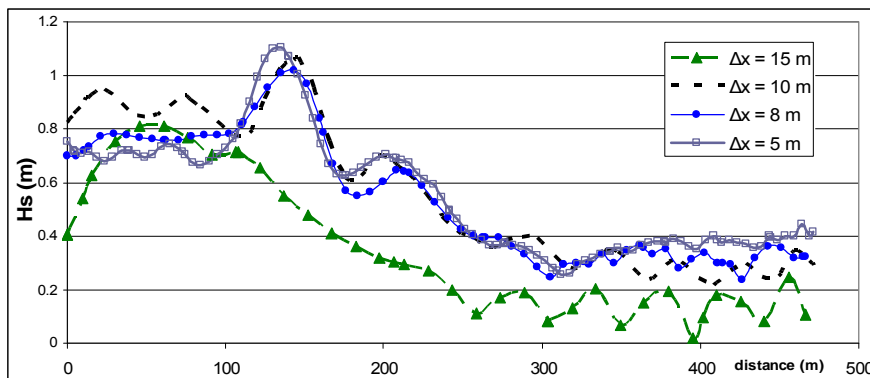


Figura 8 – Altura de onda significativa calculada ao longo do alinhamento 2 para resoluções diferentes da malha.

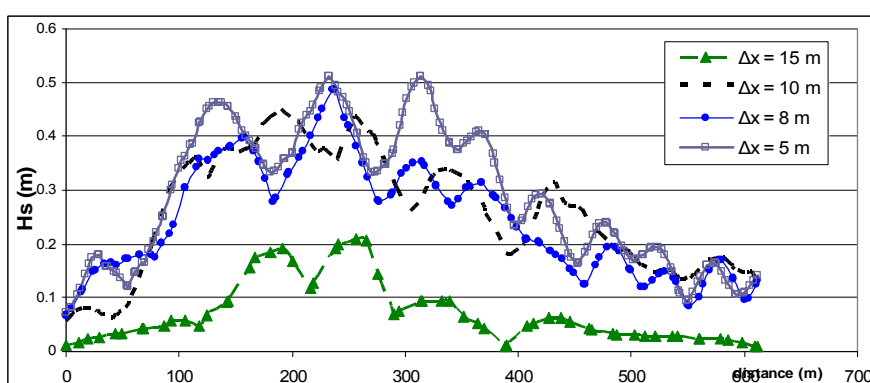


Figura 9 – Altura de onda significativa calculada ao longo do alinhamento 3 para resoluções diferentes da malha.

A simulação com uma malha de $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ não parece capaz de descrever a altura de onda no interior do porto, porque se apresenta deslocada em relação ao andamento obtido com as outras malhas mais finas. As malhas com 10, 8 e 5 m de lado dão resultados com o mesmo andamento. Para a malha com uma célula de 8 m as oscilações são menos pronunciadas do que no caso da malha de 5 m. A malha com 5 m de lado, para além do custo computacional que apresenta, apresenta oscilações excessivas que não parecem ter origem na física do problema (Figura 7). Dos resultados obtidos, pode concluir-se que tanto a malha com 8 m e 10 m de largura de célula da malha são capazes de reproduzir a transformação da onda da zona mais energética para as zonas menos expostas do porto. As recomendações feitas nos manuais do modelo de usar para largura da célula de cálculo um valor baseado no quociente $L_0/30$ (onde L_0 representa o comprimento de onda ao largo), corresponde a um valor de 8 m para um período de 14 s, o que está de acordo com as conclusões e resultados da análise de sensibilidade realizada.

Outro aspecto com interesse é a influência do tamanho da célula de cálculo no tempo de cálculo, que cresce rapidamente com o aumento de resolução da malha: a simulação com 15 m de lado (254×130 células), efectuada com um 3.2 Ghz CPU, levou menos de meia hora, com uma célula de 8 m de lado (475×244 células) uma hora e meia, e com 5 m de lado (760×380 células) quase onze horas.

Rugosidade de fundo

A rugosidade de fundo é representada no modelo através do coeficiente de Chézy. Foi realizada uma série de simulações com diferentes coeficientes de rugosidade (Tabela 3). A corrida 1 corresponde a um fundo coberto de algas; a corrida 2 a um fundo rochoso; a corrida 3



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

a uma zona escavada com irregularidades. Um fundo hipotético revestido a lajes de betão é usado na corrida 4 e a corrida 5 corresponde a uma situação não realista que coincide com o limite superior que é aceite pelo modelo. As simulações diferem apenas no coeficiente de Chézy considerado. Os restantes parâmetros são: ondas monocromáticas com $H_0=5$ m e $T=14$ s com rumo W-20°-S. A largura da célula de cálculo é de 8 m.

Tabela 3: Coeficientes de rugosidade.

Corrida	n (Coeficiente de Manning)*	C [$m^{1/2}/s$] (Coeficiente de Chézy)**
1	0.12	12
2	0.05	28
3	0.024	52
4	0.01	140
5	0.0014	900

* Chow (1981)
** $C = 1/n * R^{1/6}$, onde R (raio hidráulico) é para canais muito largos igual à altura de água. Tomou-se o valor de 4 m no interior do porto.

De acordo com Chow (1981), um fundo com areia grosseira, como o que estará presente no porto da Póvoa de Varzim, será descrito por um coeficiente de Manning no intervalo 0.028 a 0.035 (que corresponderá a um coeficiente de Chézy entre 44 e 35).

A altura média da onda no local onde se encontram as sondas está representada para diferentes rugosidades de fundo, Figura 10.

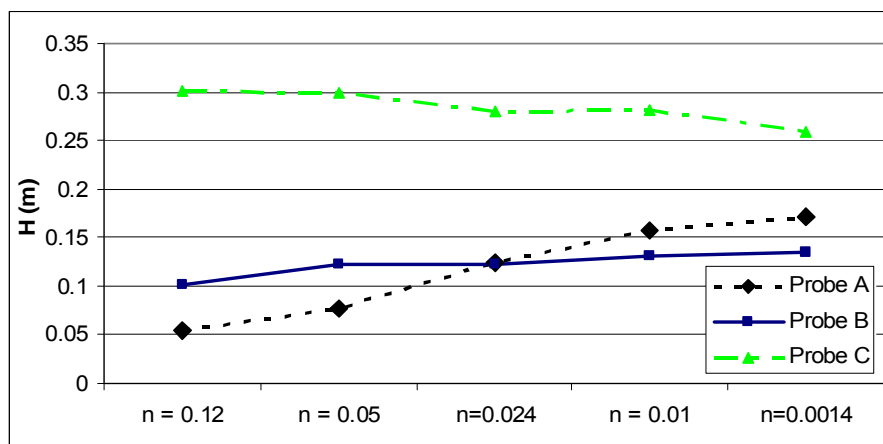


Figura 10 – Altura de onda para diferentes rugosidades de fundo (coeficientes de Manning)

A tendência de variação da altura de onda não é a mesma para todos os locais: para a Sonda A, a altura cresce à medida que o fundo é mais liso. As variações na Sonda B, que se encontra numa parte abrigada do porto são muito limitadas. O valor da altura de onda decresce ligeiramente na Sonda B à medida que o fundo é mais liso.

Enquanto a análise do valor médio da altura da onda nas sondas mostra pequenas variações com a rugosidade, a propagação instantânea é mais sensível a este parâmetro (Figura 11).

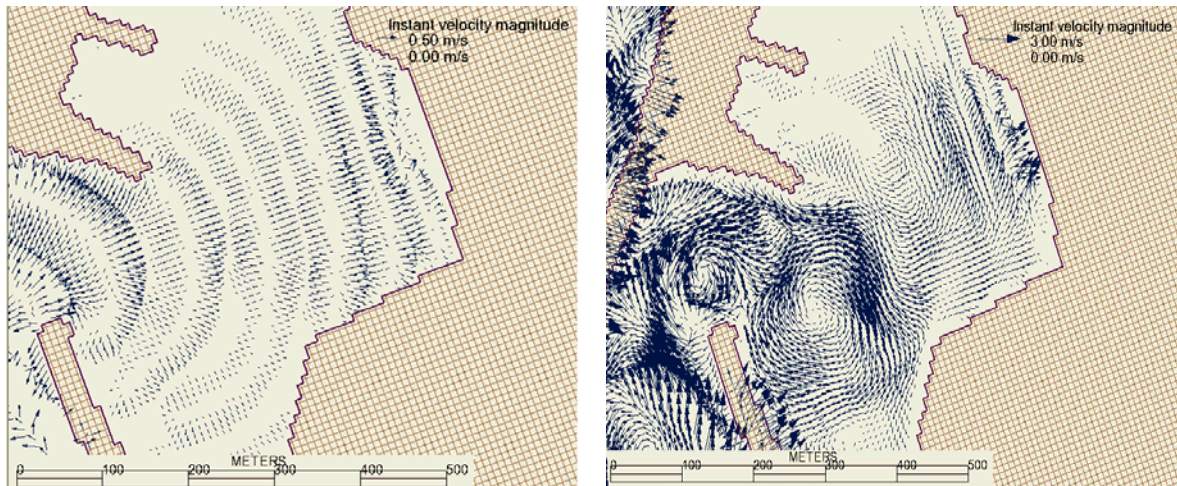


Figura 11 – Campo de velocidade horizontal da onda num dado instante num ponto de referência da coluna de água: $n=0.12$ (esquerda) e $n=0.024$ (direita). A escala dos vectores é diferente em ambas as figuras.

Um valor de $n=0.12$ corresponde a uma onda com decaimento mais rápido de energia e que se transmite para as zonas mais abrigadas com pequena velocidade. Com um valor de $n=0.05$ ou inferior, que corresponde a um fundo mais liso, a transformação da onda é mais pronunciada e transmite-se também às zonas mais abrigadas. Esta conclusão é suportada pela existência de um campo de velocidades instantâneas muito irregular e alguns vórtices.

Camadas de amortecimento

As camadas de amortecimento são definidas no modelo por um coeficiente de amortecimento μ_{nd} e por uma dada largura da camada de amortecimento w .

As camadas de amortecimento absorvem a energia da onda e são colocadas no pé das estruturas costeiras ou ao longo das fronteiras do domínio. A taxa de amortecimento não é constante na perpendicular à camada, mas cresce de zero no exterior até ao valor especificado na parte interior (Figura 12). Consequentemente, a absorção de energia da onda (correspondente a uma diminuição de altura de onda) cresce de zero até um valor máximo.

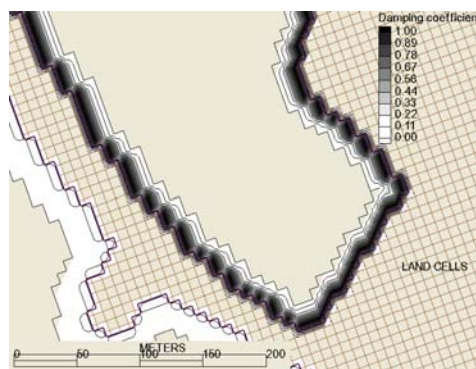


Figura 12 – Exemplo de camadas de amortecimento dentro do Porto da Póvoa de Varzim.

A linha de costa e o perímetro portuário foram divididos num conjunto de camadas de amortecimento (Figura 2), cujos valores de referência se apresentam na Tabela 1.

Uma série de simulações foi realizada para diferentes condições de amortecimento nas fronteiras: enquanto a situação de referência adopta um coeficiente de reflexão $\chi = 0.25$ para as camadas de amortecimento na vizinhança da Sonda A (enrocamento, retenções marginais e talude suave), as novas simulações realizadas consideram para as mesmas valores de $\chi=0$,

0.50 e 1, ficando iguais os valores das restantes camadas. Os coeficientes de amortecimento utilizados são representados nas Tabela 4 e 5.

Tabela 4: Condições de amortecimento para camadas na vizinhança da Sonda A totalmente absorventes ($X=0$)

Estrutura costeira	μ_{nd} (-)	w (m)
<i>Enrocamento (Rip-rap)</i>	1	16
<i>Retenção marginal (Retention works)</i>	1	16
<i>Talude suave (Mild slope revetment)</i>	1	16

Tabela 5: Condições de amortecimento para camadas na vizinhança da Sonda A parcialmente absorventes ($X=0.5$)

Estrutura costeira	μ_{nd} (-)	w (m)
<i>Enrocamento (Rip-rap)</i>	0.05	8
<i>Retenção marginal (Retention works)</i>	0.05	8
<i>Talude suave (Mild slope revetment)</i>	0.05	8

Nas figuras que se seguem a distribuição da altura de onda significativa é apresentada para três condições de absorção.

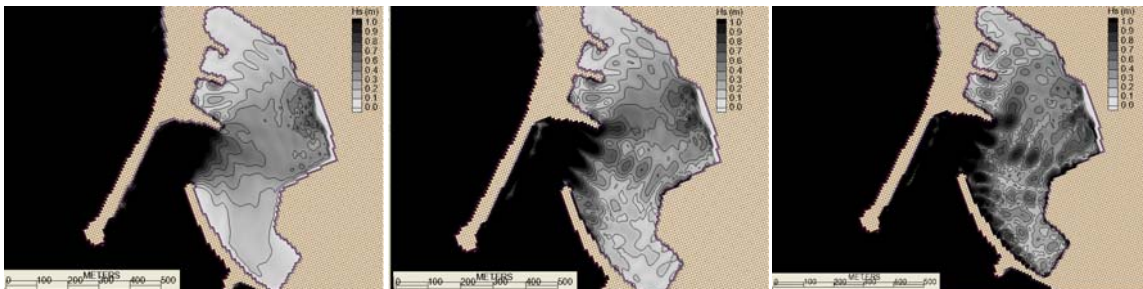


Figura 13: Altura de onda significativa calculada para as condições $X=0$ (esquerda), $X=0.5$ (centro) e $X=1$ (direita).

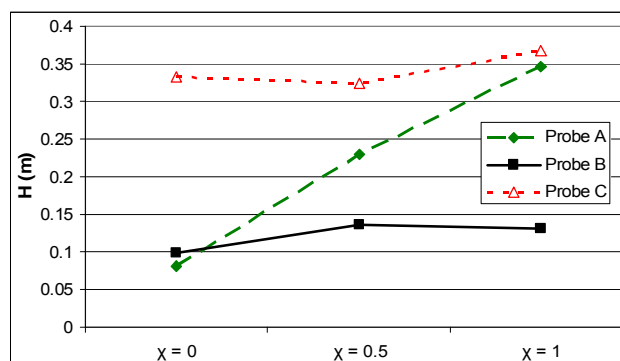


Figura 14: Altura de onda média para as três sondas e diferentes coeficientes de reflexão.

A Figura 13 põe em evidência a dependência do modelo às condições de reflexão/absorção na fronteira: maiores coeficientes de reflexão causam mais agitação residual no interior do porto, o que se verifica um pouco por todo lado e não apenas na vizinhança das estruturas. A análise da estatística da onda para pontos seleccionados, Figura 14, mostra que há um maior crescimento da altura de onda com as propriedades reflectoras da fronteira na sonda A, enquanto as sondas B e C não mostram uma tendência clara.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

5. Comparação entre o modelo Bouss2D e CGWAVE

As simulações que se tomam seguidamente referem-se ao trabalho de simulação de (L. Pipa, 2008) realizado para o mesmo layout e batimetria utilizando o modelo CGWAVE. O objectivo desta secção é fazer uma comparação qualitativa entre os resultados do modelo Bouss2D e do CGWAVE, considerando que nenhum dos modelos usou dados de campo para calibração. Os parâmetros de entrada são os mesmos e apresentam-se na Tabela 6. As condições de agitação são reproduzidas através de um espectro JONSWAP definido pelo valor H_{s0} e período de pico T_P na fronteira exterior. As condições de maré são também as mesmas: nível médio de +1.95 m e preia-mar de +3.95 m acima do zero hidrográfico. O gerador de ondas está colocado na posição 6, Figura 5.

Tabela 6: Valores adoptados para o espectro Jonswap

	H_{s0} (m)	T_P (s)
<i>Simulação 1</i>	5	14
<i>Simulação 2</i>	7	14
<i>Simulação 3</i>	6	18
<i>Simulação 4</i>	10	18

A comparação é apresentada no local das três sondas como se mostra na Figura 4.

Tabela 7: Altura de onda significativa calculada nas três sondas da Figura 4 por Bouss2D e CGWAVE. Parâmetros Jonswap: (H_{s0} , T_P) = (5m, 14s).

Sonda	Nível médio		Nível de preia-mar	
	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]
A	0.15	0.46	0.18	0.42
B	0.15	0.07	0.24	0.18
C	0.36	0.86	0.41	0.66

Tabela 8: Altura de onda significativa calculada nas três sondas da Figura 4 por Bouss2D e CGWAVE. Parâmetros Jonswap: (H_{s0} , T_P) = (7m, 14s)

Sonda	Nível médio		Nível de preia-mar	
	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]
A	0.18	0.64	0.26	0.58
B	0.13	0.10	0.22	0.25
C	0.31	1.20	0.49	0.92

Tabela 9: Altura de onda significativa calculada nas três sondas da Figura 4 por Bouss2D e CGWAVE. Parâmetros Jonswap: (H_{s0} , T_P) = (6m, 18s)

Sonda	Nível médio		Nível de preia-mar	
	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]
A	0.23	0.69	0.58	0.45
B	0.21	0.32	0.35	0.34
C	0.38	0.95	0.67	0.73

Tabela 10: Altura de onda significativa calculada nas três sondas da Figura 4 por Bouss2D e CGWAVE. Parâmetros Jonswap: (H_{s0} , T_P) = (10m, 18s)

Sonda	Nível médio		Nível de preia-mar	
	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]	Hs (m) [Bouss2D]	Hs (m) [CG wave]
A	0.32	1.15	0.51	0.75
B	0.37	0.53	0.40	0.57
C	0.49	1.58	0.52	1.22

Quando se faz a comparação entre os resultados para as mesmas condições de agitação na fronteira exterior e nível de maré, o modelo CGWAVE fornece geralmente um valor maior para H_s do que o modelo Bouss2D. Quando a influência do nível de base é analisada (nível da maré), as Tabelas 7 a 10 mostram que H_s para o modelo CGWAVE decresce nas sondas A e C, nas mesmas condições de agitação, quando o nível da maré sobe. Uma tendência contrária observa-se em todas as sondas para o modelo Bouss2D.

O “setup” do modelo Bouss2D foi mantido o mais semelhante possível ao do CGWAVE, em termos de batimetria, distância da posição da fronteira oceânica à linha de costa, condições de agitação e características de absorção das estruturas. Não obstante, muitas diferenças foram obtidas nos resultados, que poderão ser atribuídas a hipóteses de base diferentes na construção dos modelos e aos esquemas numéricos utilizados. Contudo, é importante salientar que para que os modelos sejam utilizados com capacidades de predição devem passar por uma fase de calibração e verificação. Só assim poderão ser utilizados com confiança.

6. Testes para o novo layout do porto

Foram realizados testes para avaliar a eficácia de um quebramar na redução dos níveis de agitação no interior do porto. Estes testes representam uma análise preliminar de um projecto mais vasto que inclui a melhoria das condições de abrigo e a expansão da capacidade de amarração da Marina (Figura 15). Numa primeira fase o quebramar poderá ser destacado, sendo mais tarde enraizado no molhe sul e prolongado.

Os resultados da simulação são apresentados para a situação de referência e para o novo layout tendo em vista avaliar qualitativamente a eficácia do quebramar na redução dos níveis de agitação.



Figura 15: Novo layout para a Marina. Obras de abrigo adicionais.

Setup do modelo

O quebramar destacado na Figura 15-direita foi testado com o modelo Bouss2D para um conjunto de eventos de agitação na fronteira exterior como se apresenta na Tabela 6, que são representados por espectros do tipo Jonswap.

Tendo em conta o tipo de frota que frequentará a Marina, a entrada foi dragada no modelo a uma cota -3.5 (ZH). As características de absorção/reflexão do quebramar destacado foram consideradas iguais às das retenções marginais, dado que se prevê uma obra de taludes em enrocamento: μ_{nd} foi fixado em 0.15 enquanto a largura da camada de amortecimento foi tomada como sendo $w = 20$ m. Os outros parâmetros principais de entrada para estas simulações são o coeficiente de Chézy de 35 m, correspondente a uma areia grosseira, uma onda do rumo W-20°-S e uma célula de cálculo da malha de 10 m.

Resultados para o nível médio e preia-mar

A comparação da altura de onda significativa para os três alinhamentos definidos na Tabela 6 é feita para a situação de referência (sem a estrutura) e com a estrutura (após a implementação da estrutura). O alinhamento nº1 vai da entrada do porto em direcção à bacia da Marina, o alinhamento nº 2 vai da entrada do porto em direcção à zona mais energética, enquanto o alinhamento nº 3 vai da entrada do porto em direcção à zona de pesca para controlar o efeito que a nova estrutura terá sobre esta zona. Os resultados são apresentados para o nível médio +1.95 ZH e preia-mar +3.95 ZH.

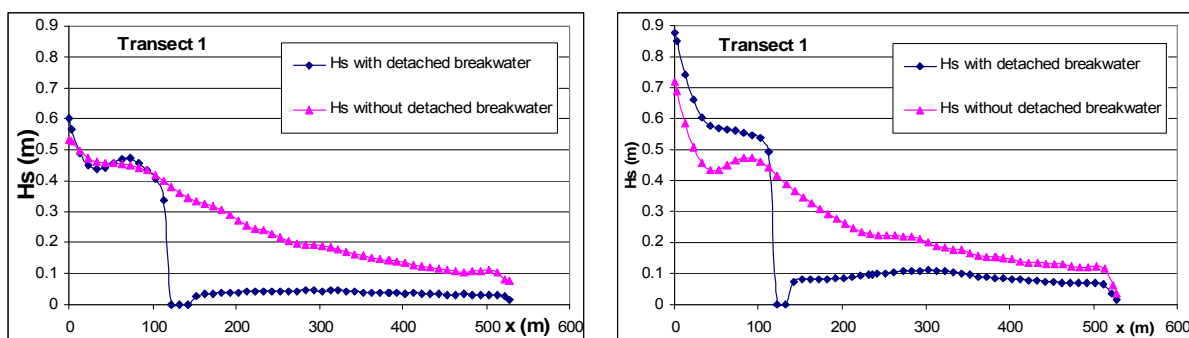


Figura 16: Hs ao longo do alinhamento nº1 para um espectro Jonswap (H_{s0}, T_P) = (5 m, 14 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

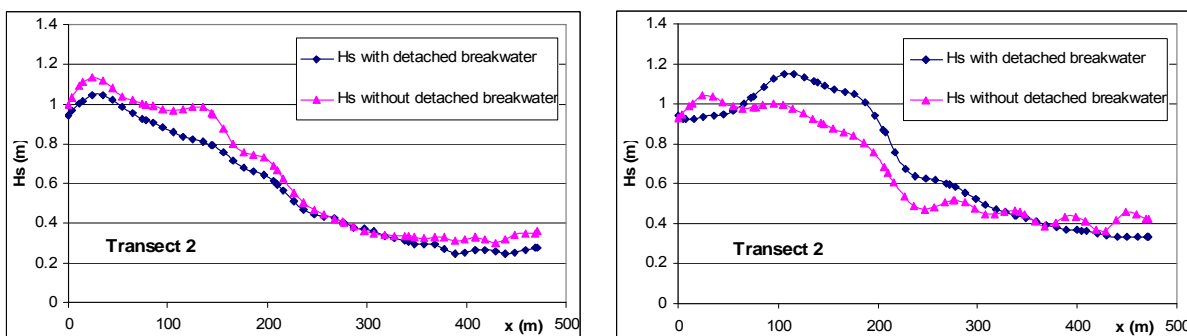


Figura 17: Hs ao longo do alinhamento nº2 para um espectro Jonswap (H_{s0}, T_P) = (5 m, 14 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

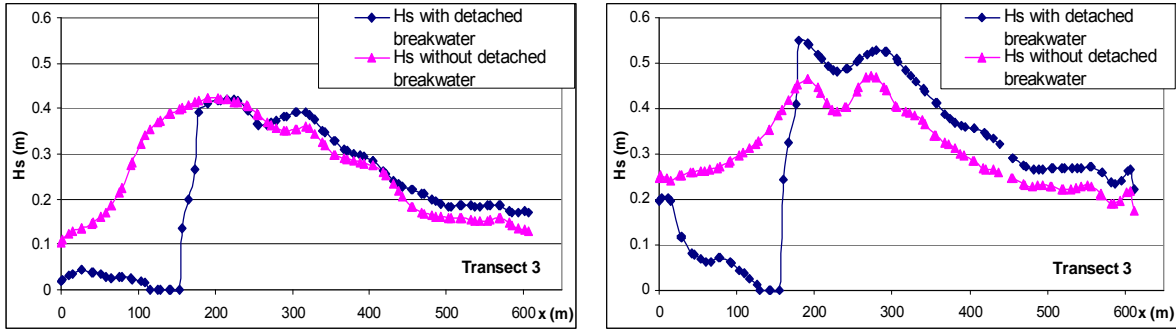


Figura 18: Hs ao longo do alinhamento nº3 para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (5 m, 14 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

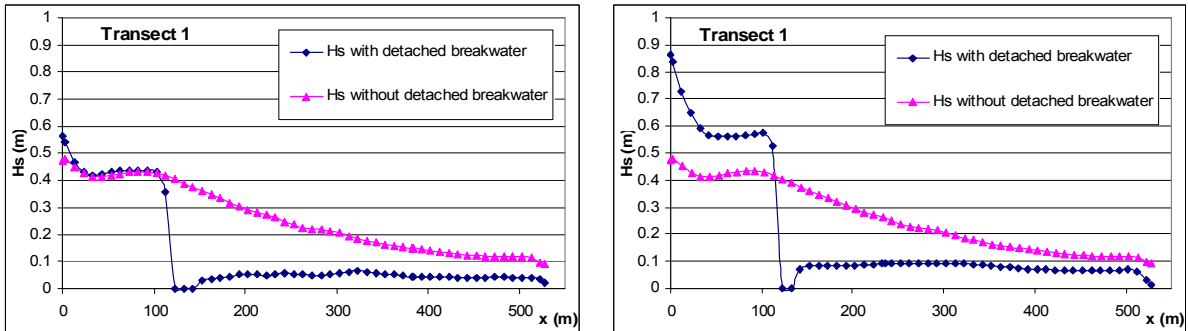


Figura 19: Hs ao longo do alinhamento nº1 para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (7 m, 14 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

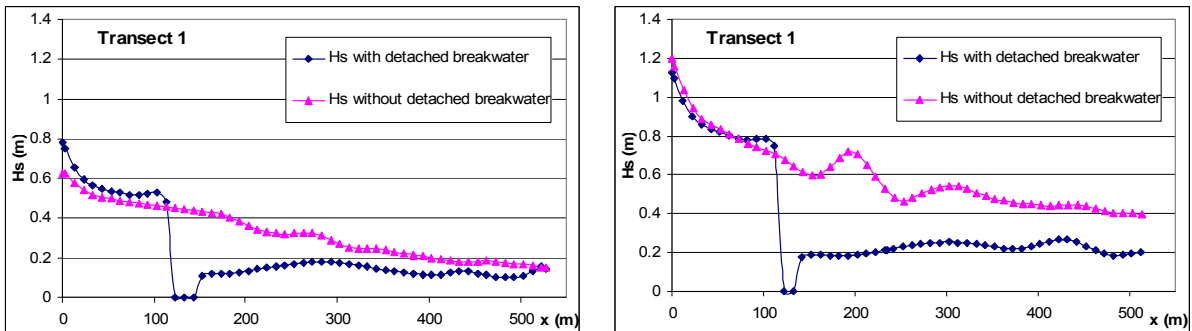


Figura 20: Hs ao longo do alinhamento nº1 para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (6 m, 18 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

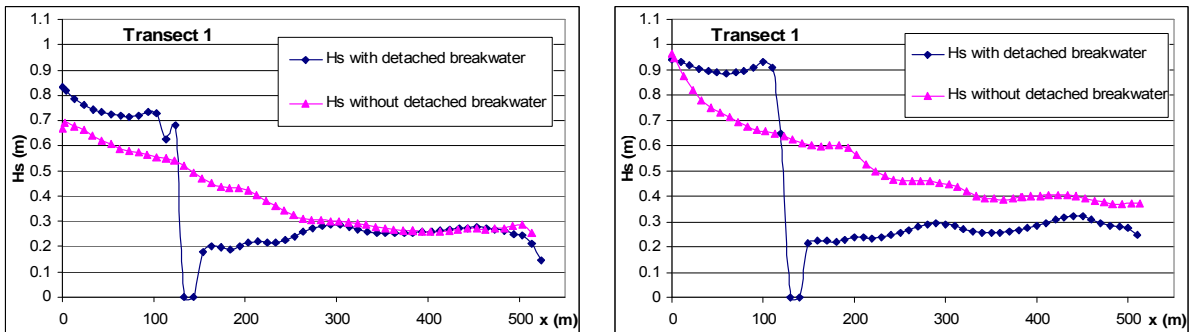


Figura 21: Hs ao longo do alinhamento nº1 para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (6 m, 18 s) numa situação de nível médio (esquerda) e preia-mar (direita)

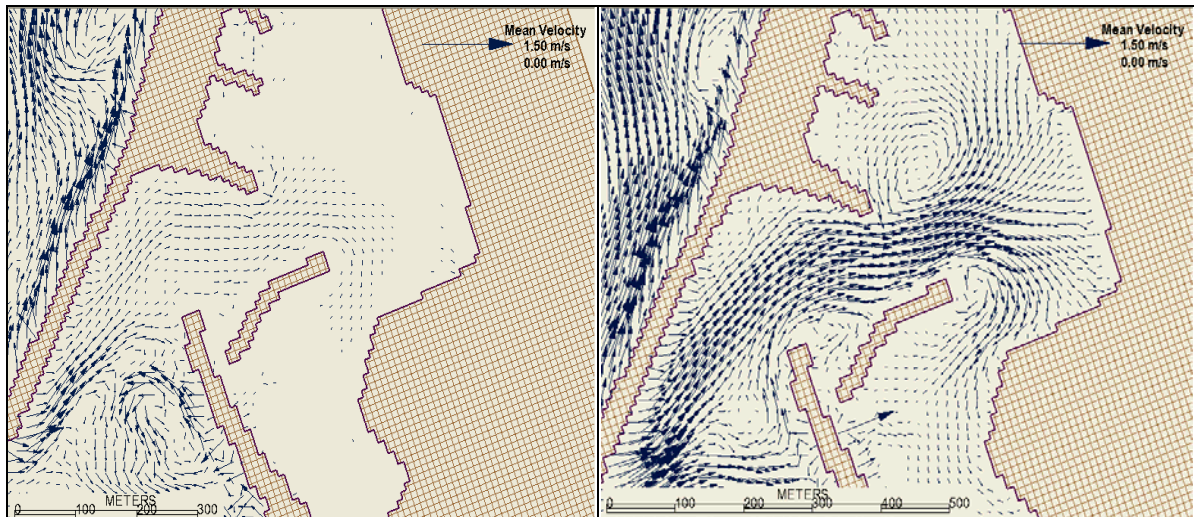


Figura 22: Vectores da velocidade media calculada para o periodo da simulacão para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (5 m, 14 s) a esquerda, e para um espectro Jonswap (H_{s0} , T_P) = (10 m, 18 s) a direita

Discussão

Os valores de H_s ao longo dos alinhamentos seleccionados mostram uma reduo clara da altura de onda na Marina (alinhamento n1) quando comparados com a situao de referência (sem quebramar). A única situao em que a melhoria  pequena corresponde  simulacão com condies espectrais na fronteira exterior de (H_{s0} , T_P) = (10 m, 18 s), onde um período maior combinado com uma altura de onda significativa de 10 m origina, para o nível médio, uma penetrao da onda que  similar  situao sem quebramar (Figura 21, esquerda). Contudo, eventos com período de pico maior do que 17 s correspondem apenas a 1,45% do clima registado na Figueira da Foz (L. Pipa, 2008), enquanto para os eventos mais frequentes o desempenho  bom no intervalo de períodos de 10 a 14 s.

O efeito combinado de um evento que apresenta um período de pico e altura elevados pode ser observado na Figura 22, onde os vectores velocidade representam a média no tempo da velocidade da onda para um ponto da coluna de água: o campo de velocidades mostra um comportamento em que as ondas entram no porto ao longo do canal de acesso e se dividem depois: umas dirigem-se para a zona da Marina e outras na direco oposta. Padrões de circulao são criados sobretudo para as ondas de maior período. A rea entre o quebramar destacado e o molhe sul poderá ser uma área de deposio de sedimentos formando-se a uma praia com o tempo, dada a reduzida exposio deste local. A mesma figura mostra uma seta de maiores dimensões sobre o quebramar que simula o galgamento que ocorre no local.

Outro aspecto com muita importância  o facto de a obra proposta não dever ser susceptível de agravar as condies na zona da pesca. O alinhamento n3  o mais apropriado para verificar o comportamento do porto nesta zona com ou sem obra de abrigo adicional. Um aumento ligeiro das condies de agitao  verificado com o quebramar adicional, na zona ocupada pela pesca (Figura 18), recomendando que se adopte uma estrutura muito absorvente.

7. Conclusões

O estudo proporciona uma compreensão das possibilidades do modelo Bouss2D para prever a penetrao das ondas no Porto da Póvoa de Varzim em condies de temporal. A análise de sensibilidade realizada deu indicaes claras sobre os valores dos parâmetros a adoptar na simulacão, como sejam a posio da fronteira oceânica, a resoluo da malha de cálculo e o coeficiente de atrito de fundo. O modelo  sensível ao valor dos coeficientes de amortecimento utilizados para descrever as características de absoro/reflexão da fronteira, valores que poderão ser ajustados em fase de calibrao do modelo.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

A comparação dos resultados com os de outro modelo (CGWAVE) aplicado ao mesmo porto, confirmam a necessidade de calibração do modelo sempre que o modelo venha a ser utilizado para tomar decisões sobre obras de engenharia.

Por fim, foi ensaiado um quebramar destacado a construir no interior do porto para condições de temporal, no sentido de melhorar as condições de abrigo na zona da Marina. A estrutura ensaiada mostra um bom desempenho na redução da altura de onda com exceção para a situação de nível-médio e ondas de 18 s.

Desenvolvimentos futuros do estudo exigiram a conjugação do modelo Bouss2D com um modelo que faça a propagação do clima de agitação do largo para a fronteira exterior do modelo que se situa em águas intermédias.

Referencias

Chow, V. T. (1981). Open-channel hydraulics. International Student Ed. McGraw Hill, pp. 109-123.

Demirbilek, Z., Nwogu, O.G. (2001). Bouss2D: A Boussinesq wave model for coastal regions and harbours. Theoretical background and user's manual. ERDC/CHL TR-01-25, Us Army Corp of Engineers, Engineer Research and Development Centre, Vicksburg, MS.

Demirbilek, Z., Panchang, V. (1998). CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation. Technical Report CHL-98-26, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Hartwing, M. (2005). IST, Numerical Wave Simulation for long-period waves in the harbor of Leixões.

Loureiro Pipa, Inês. (2008). "Melhoria das condições de abrigo na Marina da Póvoa de Varzim. Estudos em modelo matemático – Improvement in the sheltering condition of the Marina of Póvoa de Varzim". MSc these - IST Lisbon.

Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 119(6), 618-638.

Nwogu, O. (1996). Numerical prediction of breaking waves and currents with a Boussinesq model. Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering, ICCE '96, Orlando, Vol. 4, 4807-4820.

Peregrine, D.H (1967). "Long waves on a beach". Journal of Fluid Mechanics 27 (4), 815-827.

PIANC Reports (1997). "Commission for Sport and Pleasure Navigation". Review of Selected Standarts for Floating Dock Designs. Supplement to Bulletin 93, January 1997

Sant's, J.C., Nwogu, O., Navarro, A., Benito, C., Martin, M.J. (2001). Field Evaluation of A Boussinesq Model Under Highly Nonlinear And Breaking Wave Conditions. Proc. 4th Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES 2001, San Francisco, September, 2001

Schröter A, Mayerle R, Kahlfeld A, Zielke W. (1995). Assessment of a Boussinesq wave model for the design of a harbour. In International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, 1995; 741–753.