

VALIDAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS DE PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

André Filipe Pereira da Silva Contente¹, António Trigo-Teixeira² e Maria Amélia Araújo²

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa. andrecontente@gmail.com

² CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa. trigo.teixeira@ist.utl.pt; amelia.araujo@ist.utl.pt

Resumo

Este trabalho consistiu num estudo sobre o porto da Póvoa de Varzim, nomeadamente na comparação de dados adquiridos através de uma campanha de medições com os resultados fornecidos por modelos hidrodinâmicos, para condições de agitação ao largo conhecidas, registadas pela bóia ondógrafo de Leixões.

Foram utilizados três modelos numéricos disponíveis na interface SMS: o primeiro (STWAVE) serviu para propagar as condições registadas ao largo para uma zona próxima do porto, fornecendo as condições de fronteira dos restantes (CGWAVE e BOUSS-2D).

Foi também feita uma avaliação à tranquilidade da zona do porto da Póvoa de Varzim destinada às embarcações de recreio, corroborando relatos dos seus utilizadores quanto à deficiência nas condições de abrigo.

Foram detectadas algumas limitações dos modelos numéricos. Porém, para o evento apresentado, foi possível obter resultados semelhantes entre os dados medidos em campo e as simulações efectuadas.

1. Introdução e caracterização do caso de estudo

O porto da Póvoa de Varzim situa-se na cidade da Póvoa de Varzim, a 30 km a Norte da cidade do Porto (ver Figura 1). A entrada do porto está virada a Sul e encontra-se protegida por dois molhes que apresentam uma ligeira sobreposição: o molhe exterior, a Norte, com orientação Sul-Sudoeste, e o molhe interior, a Sul, orientado a Nor-Noroeste.

Possui uma zona destinada a embarcações de pesca, a Norte, e a marina da Póvoa de Varzim a Sul, para embarcações de recreio.



Figura 1 - Enquadramento geográfico e vista geral do porto da Póvoa de Varzim – Google Earth e www.marinadapovoa.com, adaptado

Este estudo incide sobre o porto da Póvoa de Varzim, mais concretamente na medição da agitação no seu interior, e posterior comparação com resultados obtidos através de modelação computacional, de modo a validar as metodologias utilizadas em projecto, e a avaliar as condições de abrigo portuário.

Para medir a agitação no interior do porto foi usado um sensor de pressão autónomo. A escolha do local de medição teve por base relatos fornecidos pelos utilizadores do porto da Póvoa de Varzim, que indicam que as ondas que incidem sobre a zona onde as embarcações de recreio estão amarradas têm uma altura que causa dificuldades à exploração portuária, sugerindo condições de abrigo deficitárias.

Durante o período de medição recolheram-se os dados registados pela bóia ondógrafo de Leixões, com o intuito de estabelecer as condições de fronteira ao largo, dos modelos de propagação de agitação a utilizar, nomeadamente o STWAVE, o CGWAVE e o BOUSS2D, disponíveis na interface Surface-water Modelling System (SMS).

Numa primeira referência a estes modelos, é possível indicar que o STWAVE serviu para propagar a agitação desde as imediações da bóia ondógrafo de Leixões até águas menos profundas, fornecendo por sua vez as condições de fronteira para os modelos de maior complexidade, e que requerem a definição de domínios de menor dimensão, para permitir um tempo de cálculo exequível.

A comparação de resultados incide sobre os modelos CGWAVE e BOUSS2D, ditos de proximidade, assim como sobre os dados tratados, oriundos da campanha de medições.

O tipo de linha de costa e do contorno portuário utilizados nos modelos CGWAVE e BOUSS-2D podem ser consultados na Figura 2 e na Tabela 1.

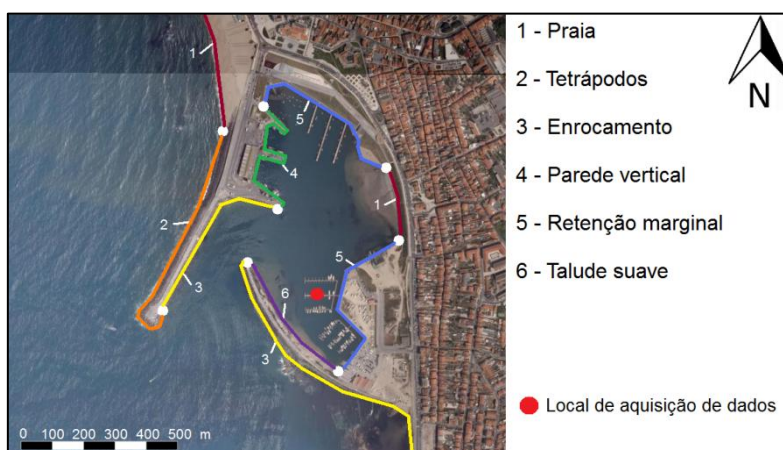


Figura 2 - Porto da Póvoa de Varzim - Caracterização da linha de costa e contorno portuário; Identificação do local de aquisição de dados

Material da linha de costa	CGWAVE	BOUSS-2D	
	Coefficiente de reflexão (-)	Espessura da camada (m)	Coefficiente de amortecimento (-)
Praia	0.10	20	1.00
Tetrápodos	0.33	25	0.10
Enrocamento	0.25	20	0.15
Parede vertical	0.90	10	0.00
Retenção marginal	0.25	20	0.15
Talude suave	0.25	15	0.15

Tabela 1 - Coeficientes de reflexão utilizados no modelo CGWAVE (Hartwig, 2005) e camadas de amortecimento utilizadas no modelo BOUSS-2D (Mazzolari & Teixeira, 2009)

O segundo objectivo deste trabalho consistiu em avaliar a tranquilidade da zona da marina. Para tal, foi tido em conta o critério desenvolvido para o efeito pela PIANC (1997). De acordo com o Regulamento de Utilização da marina da Póvoa de Varzim: “É vedado o acesso à marina de barcos com mais de 18 m de comprimento fora a fora, 11 m de boca e/ou o calado superior a 3 m, salvo autorização especial da Autoridade Marítima a solicitação prévia aos responsáveis da marina.”. Assim, e conjugando a informação das duas fontes, é possível afirmar que para ter tranquilidade no interior da marina, não podem ser registadas ondas com altura significativa superior a 30 cm, considerando as maiores embarcações de recreio que podem utilizar esta infra-estrutura.

2. Campanha de medições e tratamento de dados

2.1. *Equipamento utilizado e local de aquisição*

Para a realização da campanha de medições no interior do porto foi utilizado um sensor de pressão autónomo denominado Infinity-WH, da marca JFE ALEC CO., LTD, programável com recurso a um PC com ligação USB.

O local de aquisição de dados escolhido foi uma estaca de fixação de um pontão flutuante que se encontrava em manutenção (ver Figuras 2 e 3) durante o período da campanha, que decorreu entre 30 de Março e 27 de Abril de 2012, em modo contínuo, à frequência de aquisição de 10 Hz, apenas interrompida para manutenções semanais.



Figura 3 - Local de aquisição de dados

2.2. Período de estudo

Durante a campanha de medições, a agitação ao largo foi monitorizada pela recolha dos dados registados pela bóia ondógrafo de Leixões, cuja localização pode ser consultada na Tabela 2 e observada na Figura 4.

Latitude	Longitude	Profundidade (m)
41°19'00"N	8°59'00"N	83

Tabela 2 - Coordenadas geográficas da bóia ondógrafo de Leixões (WGS84)

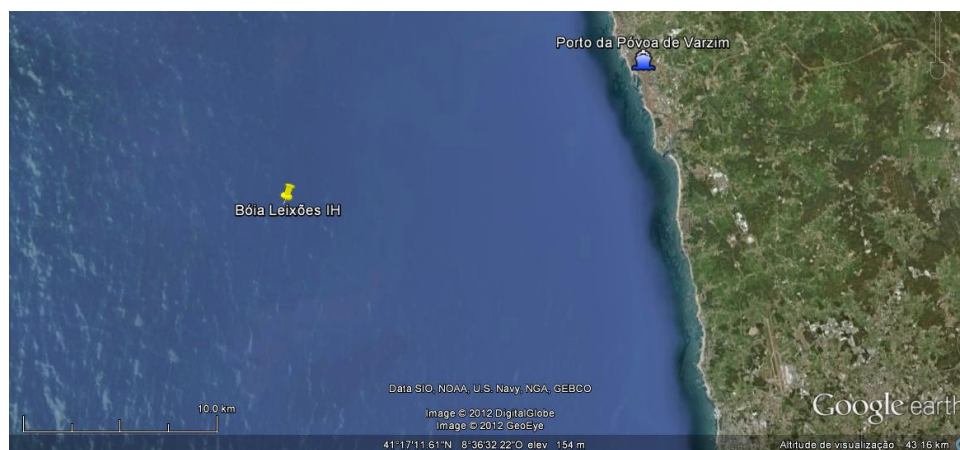


Figura 4 - Localização da bóia ondógrafo de Leixões (Google Earth)

A gravação dos dados é efectuada em séries temporais com duração de 10 minutos, destinadas a serem processadas em tempo real. O intervalo entre as séries é apenas de um ou dois minutos, que é o tempo necessário ao processamento e à apresentação da informação.

A informação disponibilizada pelo Instituto Hidrográfico (IH) é o resultado do processamento em tempo real dos registos de 10 minutos: altura significativa (H_s), altura máxima, período médio, período máximo, direcção de pico e a temperatura da água à superfície.

Indica-se que a altura significativa é calculada pela média do terço das maiores ondas registadas ($H_{1/3}$).

Tendo em conta que os dados disponíveis no sítio online do IH apenas englobam as últimas 30 horas de registo, foi necessária uma recolha diária dos mesmos, enquanto durou a campanha de medição no porto da Póvoa de Varzim.

Para este estudo, foi escolhido um evento ao largo com agitação predominante de Oeste, cujas características podem ser consultadas na Tabela 3, onde T_z corresponde ao período médio da onda.

Data de ocorrência	Direcção	H_s (m)	T_z (s)
25 de Abril de 2012 (08h00 - 10h30)	W	3.78	7.1

Tabela 3 - Caracterização do estado de agitação ao largo – Valores máximos calculados para intervalos de 30 minutos

Os dados fornecidos pelo Instituto Hidrográfico são referentes a séries temporais de 10 minutos. No entanto, para que a duração do registo seja ao mesmo tempo curta para este ser considerado um estado estacionário, e longa o suficiente para se obter médias fiáveis, optou-se por considerar intervalos de 30 minutos (Holthuijsen, 2007). Esta decisão pode induzir alguns erros, porque apesar da média dos períodos médios de três séries temporais consecutivas de 10 minutos ser idêntica ao valor do período médio de uma série temporal única de 30 minutos que englobasse as três acima mencionadas, o mesmo não se passa em relação ao cálculo das alturas significativas.

Apesar desta contrapartida, considerou-se que a opção tomada representará de maneira mais fidedigna o estado de agitação que constituiu as condições de fronteira para a modelação hidrodinâmica.

2.3. Processamento de dados

Cada ficheiro produzido pelo Infinity-WH contém informação sobre a pressão, distância à superfície livre e o potencial disponível nas baterias, ao longo do tempo.

O tratamento efectuado aos dados em bruto é descrito em seguida:

- Remoção da componente maré, usando uma média móvel (240 s) da elevação da superfície livre, como descrito por Capitão & Fortes (2011);
- Remoção da componente seicha, com um método análogo, mas considerando uma média móvel de 10 s (para a escolha deste valor foi realizada uma análise de sensibilidade *a priori*);
- Divisão das séries temporais totais em séries temporais parciais de 30 minutos;
- Realização de uma análise espectral às séries temporais parciais, recorrendo à ferramenta de cálculo FFT;
- Cálculo dos parâmetros característicos dos estados de agitação a partir dos espectros gerados.

Com vista a realizar o último passo mencionado, a formulação adoptada é apresentada seguidamente (ver Equações 1-4). Foram usadas duas equações para o cálculo de H_{m_0} de modo a representar o valor máximo ($H_{m_0}^{max}$) e o mínimo ($H_{m_0}^{min}$) que podem ser obtidos de acordo com Vandever *et al.* (2008).

$$H_{m_0}^{max} = [4.048 - 0.432v]\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$H_{m_0}^{min} = [3.852 - 0.642v]\sqrt{m_0} \quad (2)$$

sendo m_0 denominado por momento de ordem zero do espectro, definido através de m_n :

$$m_n = \int_0^{+\infty} f^n E(f) df \quad \text{for } n = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

Onde:

f – Frequência

$E(f)$ – Espectro da densidade de variância (obtido através do algoritmo FFT)

A largura de banda do espectro pode ser avaliada recorrendo ao parâmetro v (Longuet-Higgings, 1952):

$$v = \sqrt{\left(\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1\right)} \quad (4)$$

3. Modelação hidrodinâmica

Para este estudo foram utilizados três modelos numéricos disponíveis na interface SMS. O STWAVE serviu para propagar a agitação desde as imediações da bóia ondógrafo de Leixões até águas menos profundas, fornecendo por sua vez as condições de fronteira para os modelos de maior complexidade, neste caso o CGWAVE e o BOUSS-2D.

STWAVE

Os principais pressupostos do modelo STWAVE são os seguintes: não fornece informação sobre a fase da onda, é apenas válido para declives suaves, negligencia a reflexão das ondas; considera ondas, correntes e ventos em regime estacionário; assume refração e empolamento lineares, correntes uniformes em profundidade e a tensão é calculada com base na teoria linear da onda (Massey *et al.*, 2011)

Para ser introduzida no modelo STWAVE, a informação proveniente da bóia ondógrafo de Leixões necessitou de ser convertida num espectro, neste caso, num espectro do tipo JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973). A definição dos parâmetros espectrais (ver Tabela 4) foi realizada de acordo com um manual de práticas recomendadas para este tipo de operações (DNV, 2011) e com o manual de utilização do modelo STWAVE (Massey *et al.*, 2011).

H_s (m)	3.78
T_z (s)	7.1

γ	3.3
T_p (s)	9.1

T_z/T_p	0.78
------------------------------------	------

nn	4
-----------	---

Tabela 4 - Definição do espectro para o modelo STWAVE

Salienta-se que γ corresponde ao parâmetro de pico do espectro, nn ao factor dispersor direccional do espectro, e T_p o período de pico.

A simulação com o modelo STWAVE permitiu observar que, para as condições testadas, a altura da onda começou a sofrer alterações a 6.5 km da entrada do porto, não sofrendo praticamente nenhuma alteração no que respeita à direcção e período de pico, a não ser em águas muito pouco profundas (ver Figuras 4-6).

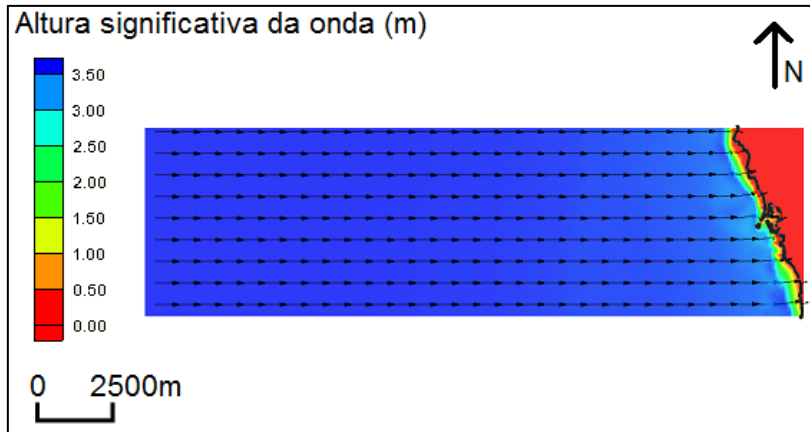


Figura 5 – Resultados do modelo STWAVE: Altura significativa

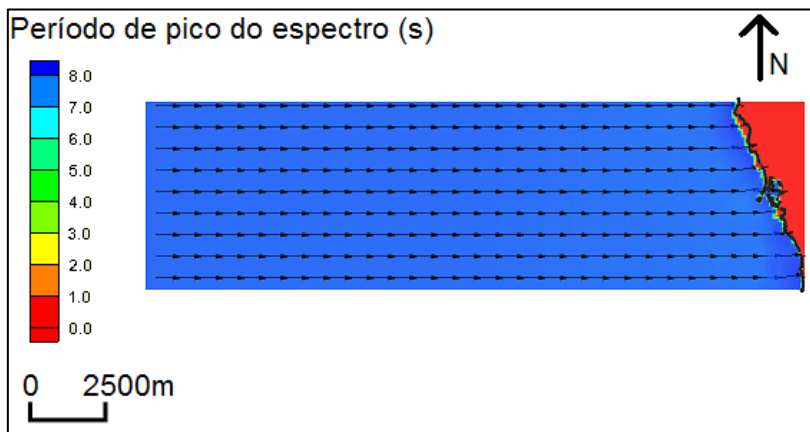


Figura 6 - Resultados do modelo STWAVE: Período de pico

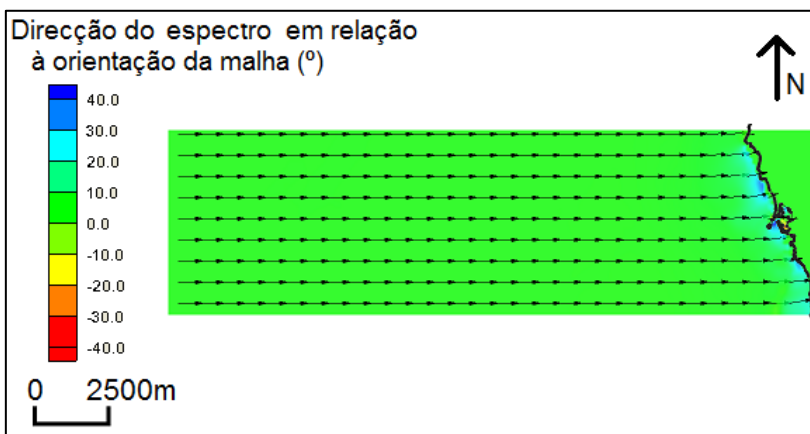


Figura 7 - Resultados do modelo STWAVE: Direcção do espectro em relação à orientação da malha

CGWAVE

O modelo CGWAVE combina a sobreposição de efeitos induzidos pelos fenómenos de refacção e difracção incluídos na equação para taludes suaves (mild slope), assim como os efeitos da dissipação por fricção, rebentação, dispersão de amplitude não linear e perdas à entrada dos portos (Dermirbilek & Panchang, 1998).

Este modelo utiliza uma malha de elementos finitos triangulares, num domínio cuja fronteira oceânica pode ser rectangular, semicircular, ou circular (quando aplicável). Permite simular ondas com períodos grandes e pequenos, tanto monocromáticas como espectrais, estas últimas pela combinação de várias simulações com ondas regulares. Não permite a inserção de informação relativa ao vento (Briggs *et al.*, 2004).

São vários os resultados que podem ser obtidos através da utilização deste modelo, de entre os quais se destacam a altura e a fase da onda.

O domínio do modelo CGWAVE foi definido tendo em conta os coeficientes de reflexão mostrados na Tabela 1 e uma análise de sensibilidade efectuada para a posição da fronteira oceânica semicircular realizada num trabalho anterior (Pipa, 2008). Foi gerada uma malha triangular de elementos finitos constituída por 72272 elementos e 36757 nós (ver Figura 8).

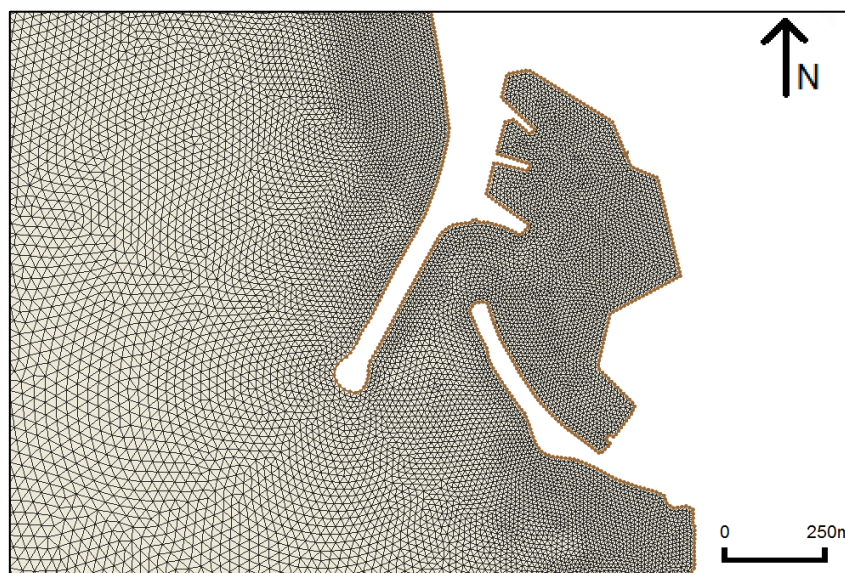


Figura 8 - Malha de elementos finitos no domínio de cálculo do modelo CGWAVE (pormenor do interior do porto da Póvoa de Varzim)

É da maior relevância referir que o modelo CGWAVE não possui a capacidade de propagar a agitação caracterizada por um espectro de uma maneira directa. Aquilo que faz é considerar um espectro como um somatório de ondas regulares com amplitudes, períodos e direcções constantes, efectuando simulações distintas para cada uma delas.

Mesmo tendo sido feitas alterações à configuração do domínio e à tolerância de convergência por omissão, esta abordagem foi inconsequente, visto nunca ter sido conseguido que o modelo atingisse a convergência definida (abortou-se a operação sempre que as simulações ultrapassavam as 150 horas).

Assim, optou-se por efectuar a simulação com o modelo CGWAVE com base em agitação regular extrapolada da informação espectral fornecida pelo modelo STWAVE. Os parâmetros característicos do estado de agitação regular considerado podem ser consultados na Tabela 5.

Amplitude (m)	1.71
Período (s)	6.3
Direcção (°)	0

Tabela 5 - Condições de fronteira do modelo CGWAVE - onda regular

Os resultados oriundos da simulação com o modelo CGWAVE podem ser observados nas Figuras 9-11. Na Tabela 6 exibe-se a altura da onda no local de aquisição de dados do Infinity-WH, assim como nos nós que se encontram num raio de 10 m da referida localização.

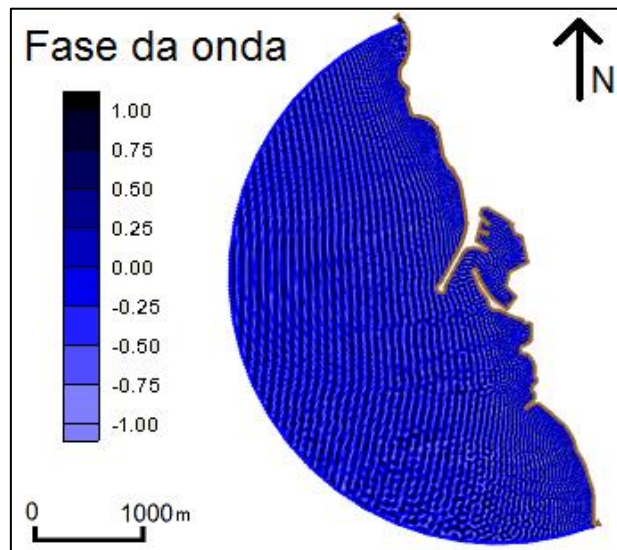


Figura 9 - Resultados do modelo CGWAVE: Fase da onda

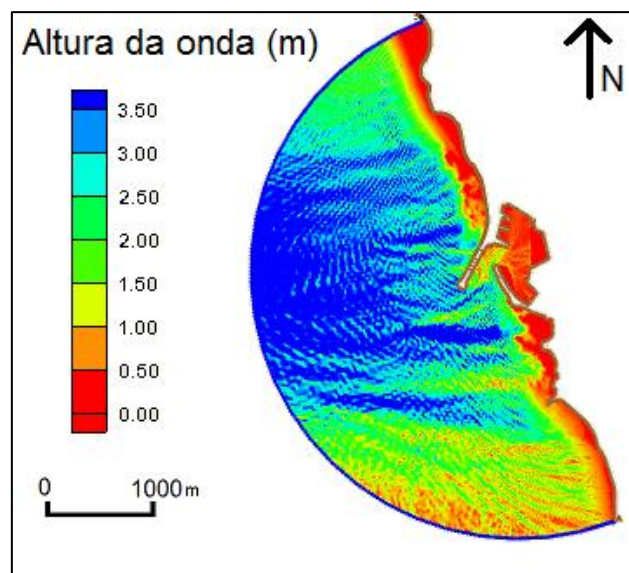


Figura 10 - Resultados do modelo CGWAVE: Altura da onda

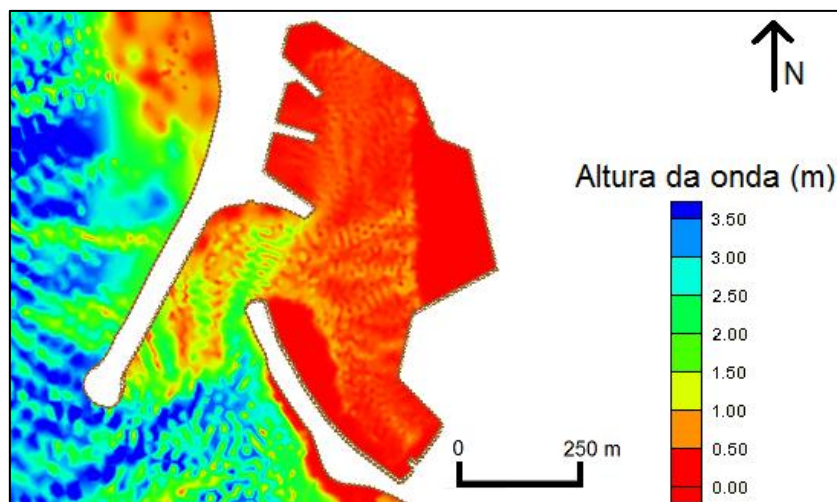


Figura 11 - Resultados do modelo CGWAVE: Altura da onda (pormenor do porto)

	Altura da onda (m)
Localização exacta	0.37
Nós no raio de 10m	0.42
	0.27
	0.20
	0.18
	0.48
	0.29
	0.53

Tabela 6 - Altura da onda (CGWAVE) na localização do Infinity-WH

Analisando o diagrama de fase (ver Figura 9), é possível observar as alterações que a batimetria provoca nas ondas. Em relação à direcção, é notória a evolução das cristas, sendo estas alteradas de modo a ficarem paralelas à batimetria, à medida que a profundidade diminui. Por outro lado, o diagrama de fase permite constatar a diminuição do comprimento de onda nas zonas menos profundas, pois verifica-se um menor afastamento entre cristas.

Para a situação estudada, nomeadamente, definindo o estado de agitação como ondulação regular, foram registadas ondas com altura significativa superior a 30 cm na zona de amarração de embarcações de recreio, valor limite para a consideração de um estado de tranquilidade definido pela PIANC (1997). Nestas zonas, chegaram a ser obtidas ondas de 55 cm, que excedem bastante o limite tido em conta.

Notou-se também que os valores para a altura de onda registados em nós circundantes à localização do Infinity-WH por vezes apresentam diferenças consideráveis (ver Tabela 6).

BOUSS-2D

O modelo BOUSS-2D simula a propagação e a transformação da agitação com base numa solução de equações do tipo Boussinesq. As equações integram a conservação da massa e de momento para ondas não lineares que se propagam em águas pouco profundas a profundidades intermédias, e simulam a maior parte dos fenómenos hidrodinâmicos que ocorrem em regiões costeiras e bacias portuárias (Nwogu & Demirbilek, 2001):

- Empolamento
- Refracção
- Difracção
- Reflexão e transmissão
- Atrito de fundo
- Interações não lineares onda-onda
- Rebentamento e espraiamento
- Correntes induzidas por ondas
- Interação onda-corrente

O modelo permite simular um bater de ondas regulares ou irregulares, inserido num domínio necessariamente rectangular. Inclui a opção de serem colocadas camadas de amortecimento, de modo a absorver a energia nas fronteiras do domínio e no contorno da bacia portuária (de modo total ou parcial), assim como camadas de porosidade, para simular a reflexão e transmissão impostas por estruturas tais como quebra-mares.

Num trabalho anterior (Mazzolari & Teixeira, 2009), para além de outros parâmetros, foi efectuada uma análise de sensibilidade para a posição do bater de ondas do modelo BOUSS-2D, para o porto da Póvoa de Varzim, para uma orientação Oeste – 20°Sul. Os resultados indicaram que, para as condições testadas, o bater não deveria ser colocado a menos de 1950 m da entrada do porto.

Para este caso, optou-se por colocar o bater de ondas sensivelmente a 2150 m da entrada do porto, inserido num domínio orientado segundo Este-Oeste (a direcção das ondas ao largo não sofreu praticamente alteração). A posição do bater coincidiu com a fronteira oceânica do modelo CGWAVE.

A geração de ondas foi efectuada com base num espectro do tipo JONSWAP, definido através dos parâmetros exibidos na Tabela 7.

Hs (m)	3.42
Tp (s)	7.9

Tabela 7 - Configuração do bater de ondas - BOUSS-2D

A largura considerada para o domínio foi de 2300m, de modo a incluir toda a zona portuária, e a dimensão das células foi de 10m×10m. O atrito de fundo foi caracterizado recorrendo a um coeficiente de Chezy (Chow, 1981) igual a 30.

Analogamente ao que foi efectuada na configuração do modelo CGWAVE, em que foram atribuídos coeficientes de reflexão consoante o tipo de material que está presente ao longo da fronteira terrestre, foi necessária a introdução de informação deste tipo no BOUSS-2D. No presente modelo, ao invés de coeficientes de reflexão são utilizadas camadas de amortecimento, caracterizadas por uma espessura e um coeficiente de amortecimento (ver Figura 2 e Tabela 1). Foram também introduzidas camadas deste tipo nas fronteiras oceânicas do domínio.

A presente configuração, apesar de contemplar e assegurar indicações para evitar a existência de instabilidades no modelo, não permitiu que as simulações terminassem com sucesso, pelo facto do modelo não ser estável.

O projecto foi então modificado, tendo sido realizados os seguintes procedimentos para a supressão das instabilidades registadas:

- Limitação da profundidade à cota de 25 m (Figura 12), com o objectivo de proporcionar uma redução no declive na zona de geração de ondas.
- Remoção das camadas de amortecimento laterais, já que estas causavam distorção junto ao bater de ondas.

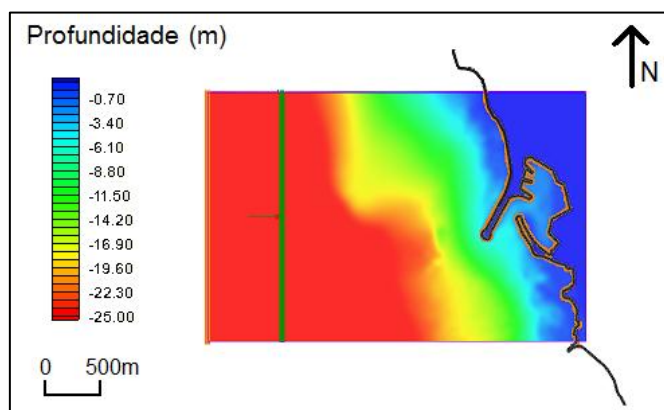


Figura 12 - Domínio de simulação do modelo BOUSS-2D – configuração final

O modelo permite a introdução de células de monitorização (probes), de onde pode ser obtido um conjunto de dados importantes, tais como a evolução da superfície livre e uma análise espectral. Deste modo, foram colocadas células deste tipo na zona correspondente à localização do Infinity-WH.

A simulação foi efectuada para uma duração de 2000 s, com a resolução temporal de 0.2 s. São exibidos de seguida o layout da altura significativa (Figura 13), a evolução da superfície livre numa célula de monitorização colocada nas proximidades do local de aquisição de dados (Figura 14), assim como o espectro de variância unidirecional calculado através da mesma (Figura 15). É ainda apresentada uma tabela síntese com os parâmetros representativos dos estados de agitação calculados pelo modelo nessa localização (Tabela 8)

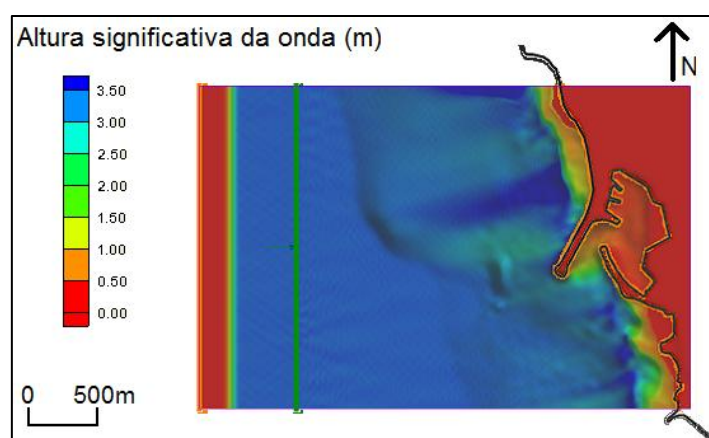


Figura 13 - Resultados do modelo BOUSS-2D - Altura significativa da onda

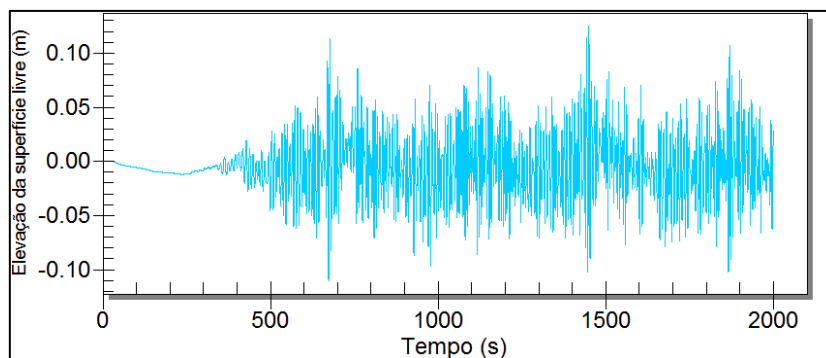


Figura 14 - Resultados do modelo BOUSS-2D - elevação da superfície livre: célula de monitorização no local de aquisição de dados pelo Infinity-WH

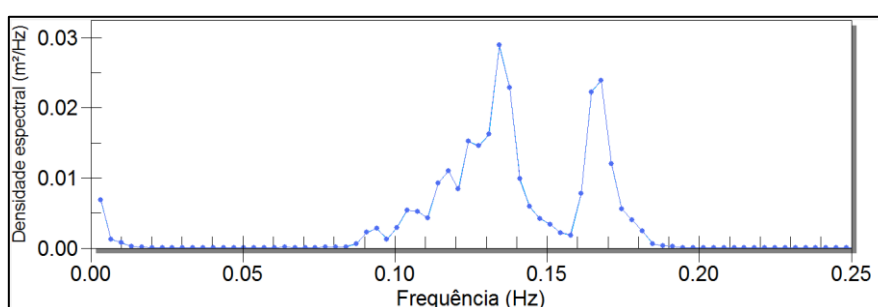


Figura 15 - Resultados do modelo BOUSS-2D - espectro de variância unidireccional: célula de monitorização no local de aquisição de dados pelo Infinity-WH

Hs (m)	0.15
Tp (s)	7.5

Tabela 8 - Resultados do modelo BOUSS-2D - parâmetros representativos do estado de agitação: célula de monitorização no local de aquisição de dados pelo Infinity-WH

Foram obtidos resultados que permitem tecer diversas considerações. Por um lado, observou-se que a maior onda que atinge as zonas de amarração das embarcações de recreio tem cerca de 20 cm, o que significa que esta situação só ultrapassa os limites sugeridos pela PIANC no caso de na zona em causa estar amarrada uma embarcação com comprimento inferior a 10 m que fosse atingida por ondulação de través (o que pela disposição dos postos de amarração não acontece). A observação do espectro gerado na localização do Infinity-WH permite identificar duas bandas espectrais, sendo que a de maior frequência deverá corresponder à onda reflectida.

Examinando o diagrama da altura de onda, verificou-se também a tendência a serem geradas instabilidades nas zonas Norte do domínio, já que são visíveis áreas onde a altura significativa é elevada, junto à fronteira do domínio.

Constatou-se que, ao contrário do modelo CGWAVE, os valores para a altura significativa da onda nas proximidades do local de aquisição de dados pelo Infinity-WH não apresentaram variações significativas.

4. Análise comparativa dos resultados numéricos/experimentais

Este capítulo tem como objectivo comparar e tecer alguns comentários acerca dos resultados obtidos através da análise espectral efectuada aos dados recolhidos no porto da Póvoa de Varzim, e pelos dois modelos numéricos de proximidade considerados, desenvolvidos a partir de princípios teóricos distintos.

Relembra-se uma vez mais que os valores que advêm do modelo CGWAVE não contemplam informação acerca do período, e que foram obtidos através da propagação de ondas regulares.

Assim, a sobreposição dos resultados experimentais e dos obtidos via modelação numérica pode ser observada nas Figuras 16 e 17.

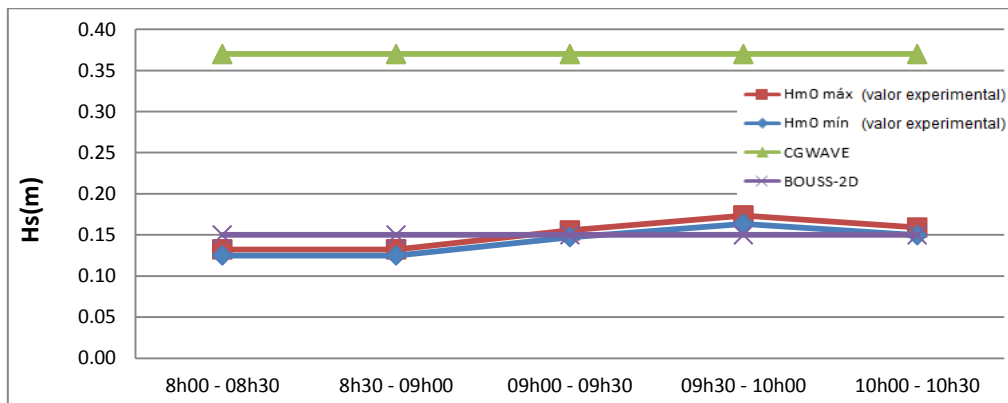


Figura 16 - Análise comparativa de resultados: Altura significativa

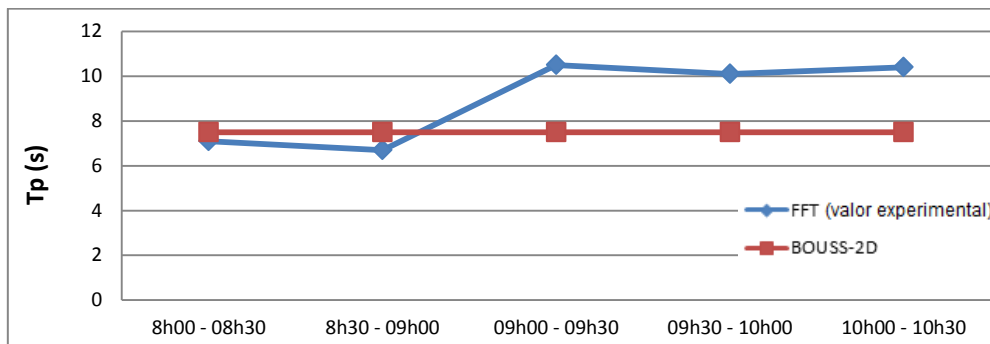


Figura 17 - Análise comparativa de resultados: Período de pico

Analisando os resultados relativos à altura significativa (ver Figura 16), verifica-se que o modelo CGWAVE fornece uma estimativa bastante superior aos valores obtidos na campanha de medições, ao contrário do modelo BOUSS-2D, que se aproxima muito dos mesmos. Esta aproximação é também evidenciada no período de pico (ver Figura 17), já que a máxima diferença obtida foi de 3 s.

5. Conclusões

Um dos principais objectivos do corrente trabalho consistiu em averiguar as condições de abrigo na marina da Póvoa de Varzim, pela comparação dos resultados obtidos através de uma campanha de medições em modelos de propagação da agitação, com valores máximos da altura de onda para portos de recreio propostos pela PIANC.

Mesmo considerando o caso mais favorável, em que as ondas atingem de proa as maiores embarcações que podem utilizar a marina, não podem ser registadas ondas com altura significativa superior a 30 cm.

Apesar de não mencionados no texto, foram também estudados eventos extremos de agitação ao largo com direcção Noroeste, e que permitiram observar ondas com altura superior a 30 cm na zona de aquisição de dados do sensor de pressão (Infinity-WH), sugerindo condições de abrigo deficitárias.

Foi necessário proceder a um tratamento inicial aos dados em bruto recolhidos pelo Infinity-WH, nomeadamente na remoção das componentes que representam os efeitos da maré e de uma seicha. Enquanto o procedimento para a remoção do primeiro já foi documentado – nomeadamente, pela subtracção de uma média móvel, a cada instante, de um intervalo de pontos seguintes – não foi encontrada bibliografia que apontasse uma solução para o segundo. Assim sendo, e tendo por base uma abordagem análoga, foi efectuada uma análise de sensibilidade para o número de pontos a utilizar no cálculo de médias móveis para a remoção da componente relativa à seicha, tendo-se obtido resultados satisfatórios para 5, 8 e 10 s.

A formulação adoptada para o cálculo da altura significativa por via espectral contempla a largura do espectro. Com base nesta formulação, foram escritas duas expressões, correspondentes ao cálculo dos valores máximos e mínimos da altura significativa, de acordo com os intervalos de aplicação de dois coeficientes. Constatou-se que as diferenças entre os valores calculados pelas duas expressões não ultrapassaram os 2 cm, para os casos analisados.

O outro grande objectivo deste trabalho consistiu na validação de modelos numéricos de propagação da agitação marítima. Foram considerados três modelos computacionais, sendo o primeiro (STWAVE) utilizado para propagar as condições ao largo para uma zona próxima do porto, fornecendo as condições de fronteira dos restantes (CGWAVE e BOUSS-2D), ditos de proximidade, e que têm origem em formulações matemáticas distintas.

Pretendeu-se simular a propagação através da definição de espectros representativos dos estados de agitação. Para um dos modelos de proximidade (CGWAVE) não foi possível esta abordagem, devido ao facto deste interpretar um espectro como uma sucessão de ondas regulares, realizando simulações distintas para cada uma, o que se traduziu em tempos de computação exagerados. Em alternativa, foi considerada uma única simulação por evento, com ondas regulares extrapoladas através de informação espectral. Sendo assim, os resultados obtidos por este modelo não podem ser directamente comparados com os resultantes da utilização do outro modelo de proximidade (BOUSS-2D).

O modelo CGWAVE apresentou estimativas por excesso para a altura significativa face aos valores medidos. Mesmo tendo sido tentada uma configuração do modelo CGWAVE menos refinada do que a utilizada, não foi possível obter resultados baseados em informação espectral.

Foram também detectadas limitações na utilização do BOUSS-2D, na medida em que foi necessário proceder a certas alterações à configuração inicial do domínio para suprimir algumas instabilidades ocorridas durante a simulação.

Os resultados obtidos pela utilização conjunta dos modelos STWAVE e BOUSS-2D estão de acordo com os calculados através da análise espectral dos dados recolhidos *in situ*, o que sugere a validade dos modelos.

Verificou-se também que o modelo CGWAVE forneceu maior variação dos resultados entre nós consecutivos, em relação ao modelo BOUSS-2D, no interior do porto.

No entanto, há que ter em conta que os dados recolhidos ao largo, pela bóia ondógrafo de Leixões, tiveram de ser equiparados a um espectro definido através de alguns parâmetros de forma que podem assumir diferentes valores, factor que pode induzir alguma variabilidade nos resultados.

Apesar de não ter sido possível suplantar algumas limitações, julga-se que este trabalho atingiu grande parte dos objectivos a que se propôs, não só a nível da validação dos modelos, mas também pela avaliação da tranquilidade no interior da marina da Póvoa de Varzim, corroborando os relatos dos seus utilizadores acerca da mesma.

Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem o apoio de duas entidades: o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a quem se agradece a colaboração da Doutora Conceição Juana Fortes e do Doutor Rui Capitão; e o Clube Naval Povoense, nomeadamente do seu presidente Paulo Neves.

Bibliografia

- Briggs, M., Donnell, B. & Demirbilek, Z., 2004. How to use CGWAVE with SMS: An example for Tedious Creek Small Craft Harbor, s.l.: US Army Corps of Engineers.
- Capitão, R. & Fortes, C., 2011. Análise comparativa entre estimativas do modelo SWAN e medições de agitação marítima efectuadas na Praia da Amoreira, Portugal. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 11(3).
- Chow, V., 1981. *Open-Channel Hydraulics*. s.l.: McGraw-Hill International Student Editions.
- Demirbilek, Z. & Panchang, V., 1998. *CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation*. Washington(DC): U.S. Army Corps of Engineers.
- DNV, 2011. *Recommended Practice DNV-RP-H103 - Modelling and Analysis of Marine Operations*, s.l.: Det Norske Veritas.
- Hartwig, M., 2005. Numerical wave simulation for long-period waves in the harbor of Leixões. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E. & Carlson, H., 1973. *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Hamburgo: DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT.
- Holthuijsen, L., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge, NY: Cambridge University Press.
- Longuet-Higgins, M., 1952. On the statistical distribution of the heights of sea waves. *J. Mar. Res.*, 11(3), pp. 245-266.
- Marina da Póvoa de Varzim, n.d. [Online]
Available at: <http://www.marinadapovoa.com/>
[Accessed 2012 - in Portuguese].
- Massey, T., Anderson, M., Smith, J. & Gomez, J., 2011. *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model - User's Manual for STWAVE, Version 6.0*, Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- Mazzolari, A. & Teixeira, A., 2009. Numerical modeling of wave agitation in the harbor of Póvoa de Varzim: Comparison of a Boussinesq type model with a mild slope equation model, Lisboa: IST - Relatório interno.
- Nwogu, O. & Demirbilek, Z., 2001. *BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors*, s.l.: US Army Corps of Engineers.
- PIANC, 1997. *Review of selected standards for floating dock designs - Supplement to Bulletin nr. 93*, s.l.: Commission for Sport and Pleasure Navigation (SPN).
- Pipa, I., 2008. Melhoria das condições de abrigo na marina da Póvoa de Varzim. Estudos em modelo matemático. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Vandever, J., Siegel, E., Brubaker, J. & Friedrichs, C., 2008. Influence of spectral width on wave height parameter estimates in coastal environments. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, Issue May/June, pp. 187-194.