

PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO PORTO DE VILA DO PORTO

Pinheiro, L.V., Fortes, C.J.E.M.

Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa. Email: lpinheiro@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

Resumo: *O modelo BOUSS3W permite uma descrição da evolução de estados de mar em zonas abrigadas de profundidade variável. Este modelo resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu com termos adicionais para modelar a geração das ondas no interior do domínio, a absorção e reflexão das ondas nas fronteiras e para controlar as oscilações numéricas. O modelo usa uma malha de elementos finitos para a discretização espacial e foi desenvolvido para aplicações a uma ou duas dimensões, permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal em cada ponto do domínio de aplicação.*

O modelo BOUSS3W é uma evolução do modelo BOUSSiiw no qual a condição de reflexão parcial nas fronteiras do domínio de cálculo foi implementada. O método utilizado baseia-se no consiste em modificar as equações de Boussinesq através da substituição da velocidade por uma velocidade em função da porosidade da estrutura reflectora e pela adição de dois termos que permitem a dissipação de energia por atrito. Com esta nova funcionalidade o modelo pode ser aplicado a bacias portuárias tendo em conta as condições reais de reflexão/absorção das suas fronteiras físicas. Adicionalmente o método implementado permite simular a reflexão e transmissão de ondas por obstáculos físicos localizados no interior do domínio, como é o caso, por exemplo, de quebra-mares destacados.

Nesta comunicação, primeiramente valida-se a nova condição de reflexão parcial num canal de profundidade constante unidimensional. Os resultados são comparados com resultados de fórmulas empíricas. De seguida, aplica-se o modelo BOUSS3W na zona do porto de Vila do Porto. Os resultados são comparados com resultados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC.

1. INTRODUÇÃO

A propagação de ondas numa zona portuária está sujeita a diversos fenómenos entre os quais se destacam os fenómenos da refração, difração, reflexão e interacções não-lineares. Estes processos de transformação de onda levam à alteração da sua forma, direcção, altura e período.

O modelo BOUSS3W (Boussinesq Wave Model for Harbours) incorpora todos os fenómenos enumerados e permite uma descrição da evolução de estados de mar reais (definidos a partir de séries temporais medidas no local ou a partir dum espectro definido) em zonas abrigadas de profundidade variável. Este modelo resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993), válidas desde águas de profundidade intermédia a águas pouco profundas. O modelo usa o método de Galerkin com uma malha não estruturada de elementos finitos para a discretização espacial e foi desenvolvido para aplicações a uma ou duas dimensões (em planta), permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (representativa) em cada ponto do domínio de aplicação.

O modelo BOUSS3W é uma evolução do modelo BOUSSiiw (Walkley 1999, Pinheiro *et al.* 2007b) em que a condição de reflexão parcial nas fronteiras foi implementada. Com esta nova funcionalidade o modelo pode ser aplicado a bacias portuárias tendo em conta as condições reais de reflexão/absorção das fronteiras físicas. O método utilizado baseia-se no trabalho de

Nwogu e Dermirbilek (2001) e consiste em modificar as equações de Boussinesq, nomeadamente a substituição da velocidade por uma velocidade função da porosidade e a adição de dois termos adicionais que permitem a dissipação de energia por atrito. Adicionalmente o método implementado permite simular a reflexão e transmissão de ondas por obstáculos físicos localizados no interior do domínio, como é o caso por exemplo de quebra-mares destacados.

Neste trabalho, primeiramente valida-se a nova condição de reflexão parcial num canal de profundidade constante. Os resultados são comparados com resultados de fórmulas empíricas (Seeling e Ahrens, 1995). De seguida, para analisar o desempenho do modelo BOUSS3W numa situação real, mais especificamente da nova condição de reflexão parcial, decidiu-se aplicá-lo ao caso de teste de simulação da propagação de ondas (regulares) na zona do Porto de Vila do Porto uma vez que em 2006 foram realizados ensaios físicos no LNEC (Fortes *et al.* 2006) e os resultados destes ensaios constituem um excelente meio de verificação e validação de modelos numéricos.

2. O MODELO BOUSS3W

2.1. Introdução

BOUSS3W (Walkley 1999, Pinheiro *et al.* 2007b) resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993), válidas desde águas de profundidade intermédia a águas pouco profundas, e é um modelo indicado para a propagação de ondas não lineares e dispersivas pois permite reproduzir alguns dos processos mais importantes presentes em regiões costeiras de média a baixa profundidade: a difracção, a refracção, a reflexão, o empolamento, a dispersão de energia para as harmónicas.

Para a integração na vertical, foi admitido um perfil de velocidades tipo a uma profundidade pré-definida. O modelo usa o pacote SPRINT (Berzins *et al.* 1984), para a integração temporal e o método de Galerkin com uma malha não estruturada de elementos finitos para a discretização espacial. As malhas de elementos finitos são geradas com o gerador automático GMALHA, Pinheiro *et al.* (2007a), especialmente criado para modelos de propagação de ondas marítimas. Para a geração das ondas (regulares e irregulares) no domínio encontra-se implementada uma condição de geração no interior do domínio por intermédio de uma função fonte, segundo o procedimento de Wei *et al.* (1999). Esta condição permite não só a geração das ondas mas também que as ondas reflectidas nas fronteiras físicas do domínio e que se propagam na direcção da fonte, possam ser absorvidas evitando a sua permanência no domínio e consequente adulteração das características das ondas.

Como condições de fronteira, são admitidas condições de reflexão ou de absorção total. A condição de absorção total é conseguida através da colocação de uma zona absorvente ("sponge layer"). Para a simulação da interacção das ondas com uma fronteira física (como é o caso de um quebra-mar ou um cais, falésias rochosas, etc.) é imposta uma condição de fronteira de reflexão total. Este modelo foi desenvolvido para aplicações a uma e duas dimensões (em planta), permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (representativa) em cada ponto do domínio de aplicação.

2.2. Equações e método numérico

As equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993) são as que se seguem:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + g \nabla \eta + \frac{Z_\alpha^2}{2} \nabla \left(\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + Z_\alpha \nabla \left(\nabla \cdot \left(h \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot ((h + \eta) \mathbf{u}) + \nabla \cdot \left(\left(\frac{Z_\alpha^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) h \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \left(Z_\alpha + \frac{h}{2} \right) h \nabla (\nabla \cdot (h \mathbf{u})) \right) = 0 \quad (2)$$

em que o vector de velocidade $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, t) = (u, v)$ representa o campo de velocidades bidimensional, calculado numa determinada profundidade, Z_α , $\eta = \eta(x, y, t)$ representa a elevação da superfície livre, h é a profundidade do fundo e g é a aceleração da gravidade. A resolução espacial destas equações é efectuada pelo método dos elementos finitos.

O modelo utiliza o pacote de integração temporal SPRINT, Berzins *et al.* (1984). Este software fornece um método geral de resolução de sistemas de equações diferenciais parciais ordinárias utilizando passos de tempo e ordens de integração variáveis. As matrizes, nos casos bidimensionais são esparsas pelo que o método de resolução passa pela factorização da matriz jacobiana.

2.3. Malha de elementos finitos

O gerador de malhas GMALHA, Pinheiro *et al.* (2007a), foi desenvolvido especialmente para a geração de malhas não estruturadas de elementos triangulares usadas por modelos de propagação de ondas marítimas. Para uma dada zona costeira, ele gera, a partir da fronteira e da batimetria dessa zona, uma malha otimizada, sujeita a um refinamento local condicionado pela batimetria e ao controlo da uniformidade dos elementos, dos ângulos internos e das valências de cada nó. O refinamento local é controlado pelo número de pontos por comprimento de onda desejado. A malha é renumerada de modo a minimizar a largura de banda das matrizes. É importante salientar que é de grande vantagem para o método de resolução de equações, que a malha de elementos finitos tenha a numeração nodal ordenada.

2.4. Controlo da estabilidade numérica

No método dos elementos finitos, especialmente se a malha contiver irregularidades, podem surgir oscilações espúrias, que inviabilizam a obtenção duma solução numérica. Uma das formas de atingir a estabilidade numérica passa pela introdução de difusão artificial. A difusão artificial é introduzida através de um termo viscoso que se adiciona à equação de conservação da massa. Este termo, ao eliminar as oscilações espúrias, impede que os erros se acumulem ao longo do tempo.

O termo difusivo é de segunda ordem, proporcional a v_s , está presente em todo o domínio e é adicionado à equação da conservação da massa:

$$\dot{\eta} + \frac{\partial P}{\partial x} + \beta H^3 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = v_s \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (3)$$

em que v_s (m^2/s) está relacionado com o comprimento de onda, λ , e também com o espaçamento da malha, Δx , e é dado por.

$$v_s = \frac{\gamma \cdot \lambda^4}{(2 \cdot \pi \cdot \Delta x)^3} \quad (4)$$

O parâmetro γ (m/s) depende da qualidade da malha e é obtido através de testes prévios.

2.5. Geração de ondas no interior do domínio

Na simulação numérica da propagação de ondas num dado domínio, ocorrem, em algumas circunstâncias, reflexões significativas no seu interior que vêm a incidir sobre a fronteira de entrada das ondas. A condição clássica de geração de ondas na fronteira não é capaz de lidar com estas perturbações uma vez que não é possível prever as suas características *a priori*.

Uma maneira de resolver este problema é gerando as ondas no interior do domínio. As ondas reflectidas podem passar através desta zona sem alterar as condições de geração e propagam-se até sair do domínio através duma fronteira de saída. Este método é particularmente eficiente em simulações de longo termo em domínios geometricamente complexos.

A metodologia utilizada foi a implementação de uma função fonte, baseada no trabalho de Wei *et al.* (1999). A amplitude da função fonte, D , resulta da linearização das equações de Boussinesq de modo a obter uma relação explícita com a altura de onda desejada:

$$D = 2 \cdot a \cdot \frac{(\omega^2 - \alpha_1 \cdot g \cdot k^4 \cdot h^3) \cdot \cos(\varphi)}{\omega \cdot I_1 \cdot k \cdot (1 - \alpha(kh)^2)} \quad (5)$$

em que $\alpha_1 = \alpha + 1/3$, $\alpha = -0.390$, φ é o ângulo de incidência das ondas em relação à direcção principal de propagação. A função fonte vai oscilando com o tempo entre $-D$ e D , Figura 1. A zona de geração é distribuída sobre vários pontos da malha numa largura de W .

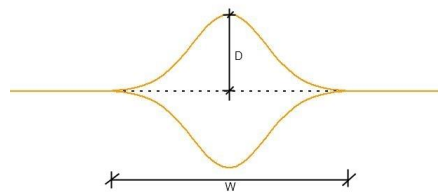


Figura 1. Esquema da geração de ondas no modelo BOUSS3W.

2.6. Condições de fronteira

Inicialmente, as condições de fronteira implementadas no modelo original eram as condições de reflexão total e de radiação. A condição de reflexão total representa uma parede vertical sólida e impermeável. Para a condição de radiação, introduz-se uma zona de absorção nas fronteiras onde se pretende a absorção total das ondas incidentes. Trata-se de uma zona onde se adiciona um termo difusivo à equação de conservação de massa que cresce exponencialmente em direcção à fronteira e é capaz de absorver a energia das ondas que saem do domínio com diferentes frequências. A largura da zona de absorção deve ser entre duas e três vezes o comprimento de onda.

No presente trabalho introduziu-se uma nova condição de fronteira no modelo numérico: a condição de fronteira de reflexão parcial. De seguida, descrevem-se mais detalhadamente as condições de fronteira implementadas no modelo numérico.

2.6.1. Reflexão total

A condição de reflexão total simula a interacção das ondas com fronteiras físicas verticais, sólidas e impermeáveis (como é o caso de um cais vertical, quebra-mar vertical, etc.). A condição de impermeabilidade e de conservação da massa implicam:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ e } \mathbf{w} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (6)$$

sendo \mathbf{n} o vector perpendicular à fronteira.

2.6.2. Absorção total (Sponge layers)

A condição de absorção total simula a absorção total da energia das ondas, para isso acontecer introduz-se uma zona de absorção na fronteira. Trata-se de uma zona onde se adiciona um termo difusivo à equação de conservação de massa que é capaz de absorver a energia das ondas que saem do domínio com diferentes frequências. A largura da zona de

absorção deve ser entre duas e três vezes o comprimento de onda. Nesta zona o termo v_s parte do seu valor inicial v_1 e cresce exponencialmente em direcção à fronteira:

$$v_s = v_2 \cdot \frac{e^{\left(\frac{x-x_s}{x_f-x_s}\right)^2} - 1}{e - 1} + v_1 \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{30}{T} \quad (8)$$

onde, v_1 é a viscosidade usada no resto do domínio para controlar as oscilações numéricas e v_2 é o valor máximo pretendido para a viscosidade na fronteira. Na versão unidimensional, as oscilações numéricas não são significativas pelo que v_1 é zero, mas na versão bidimensional por vezes é necessário dar um valor a este parâmetro.

2.6.3. Reflexão

A condição de reflexão parcial simula a absorção de uma parte da energia da onda e a reflexão da restante parte. O método utilizado baseia-se no trabalho de Nwogu e Dermirbilek (2001) e permite que ainda que alguma energia seja transmitida para jusante duma estrutura reflectora, como por exemplo um quebra-mar poroso. O método consiste em modificar as equações de Boussinesq, nomeadamente substituir u por u/p_s (sendo p_s a porosidade da estrutura) nos termos p e f e em estendê-las com dois termos adicionais que permitem a dissipação de energia por atrito.

$$p = (h + \eta) \frac{u}{p_s} \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{u}{p_s} \right)^2 + p_s g \eta \quad (10)$$

$$\dot{u} + \frac{\partial f}{\partial x} + A_1 h^2 \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial x^2} + A_2 h \frac{\partial^2}{\partial x^2} (h \dot{u}) + p_s f_l u + p_s f_t |u| = 0 \quad (11)$$

onde f_l e f_t são os factores de atrito laminar e turbulenta, respectivamente. Estes factores são obtidos utilizando as relações empíricas obtidas por Engelund (1953):

$$f_l = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{p_s^2} \frac{\nu}{d^2} \quad (12)$$

$$f_t = \beta_0 \frac{(1-p_s)}{p_s^3} \frac{1}{d^2} \quad (13)$$

onde ν é a viscosidade cinemática da água, d é o diâmetro característico dos blocos, e α_0 e β_0 são constantes empíricas entre 780 e 1500, e 1.8 e 3.6 respectivamente. O diâmetro característico dos blocos é dado por:

$$d = \left(\frac{W_s}{g \cdot \rho_s} \right)^{1/3} \quad (14)$$

onde W_s é o peso dos blocos em kN e ρ_s é a massa volúmica do material dos blocos (2.65 kg/m³.para enrocamento e 2.3 kg/m³ para blocos de betão).

As zonas de porosidade e de absorção devem ser introduzidas no espaço de forma gradual para evitar o aparecimento de instabilidades numéricas devidas a esta descontinuidade. É então usada uma função de crescimento quadrático numa largura de metade da largura da zona de absorção. A Figura 2 mostra como variam a viscosidade e a porosidade nas imediações de uma fronteira parcialmente reflectiva.

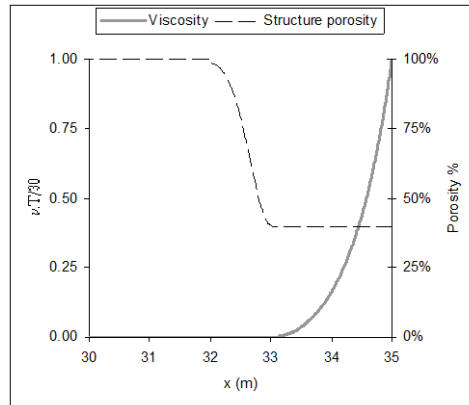


Figura 2. Variação da viscosidade e da porosidade nas imediações de uma fronteira parcialmente reflectiva.

2.7. Dados e resultados

O modelo BOUSS3W requer como dados de entrada:

- as características da agitação incidente:
 - ondas regulares: período e amplitude da onda, localização da zona de geração;
 - ondas irregulares: série temporal das ondas incidentes, localização da zona de geração;
- as características da malha de elementos finitos com que foi discretizado o domínio:
 - coordenadas dos pontos e respectivas profundidades;
 - composição dos elementos;
- as condições de fronteira;
- a distribuição de viscosidades no domínio e nas zonas absorventes;
- os parâmetros de saída do modelo.

O modelo BOUSS3W produz como resultados:

- Mapas da elevação da superfície livre e componentes da velocidade em todo o domínio em determinados instantes de cálculo;
- Séries temporais da elevação da superfície livre em determinados pontos;
- Diagramas de isolinhas dos índices de agitação máximos em todo o domínio.

3. APLICAÇÃO NUMÉRICA

Nesta secção, apresentam-se as condições de cálculo, os resultados numéricos obtidos com o modelo numérico BOUSS3W e as comparações dos resultados numéricos e experimentais.

Os cálculos foram efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro

processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM.

3.1. Canal de profundidade constante 1D

De modo a validar a nova condição de fronteira de reflexão parcial, o modelo unidimensional BOUSS3W foi aplicado a um caso simples de propagação de ondas regulares sobre um fundo plano (Pinheiro *et al.* 2009).

3.1.1. Condições de cálculo

O canal tem 35 m de comprimento e uma profundidade de 0.4 m, Figura 3. A onda incidente gerada é uma onda regular de 0.01 m de amplitude e 2.0 s de período. O comprimento de onda é de 3.7 m. O domínio foi discretizado por elementos finitos de dois nós. O espaçamento entre nós é de $\Delta x = 0.01$ m. A função fonte situa-se em $x = 8$ m. A zona de geração tem 3.7 m de largura, o que equivale a um comprimento de onda.

Foram colocadas duas zonas absorventes com 2 m de largura nas duas extremidades do domínio. No caso da reflexão total a zona absorvente da direita não foi colocada. Uma zona porosa com 1 m de largura foi colocada antes da zona absorvente da direita.

Testaram-se vários valores de porosidade nomeadamente $p_s = 0.4, 0.5, 0.75$ e 0.9 . Não foi possível simular valores mais baixos que 0.4, pois verificaram-se problemas de instabilidade numérica.

O tempo total de simulação foi de 60 s.

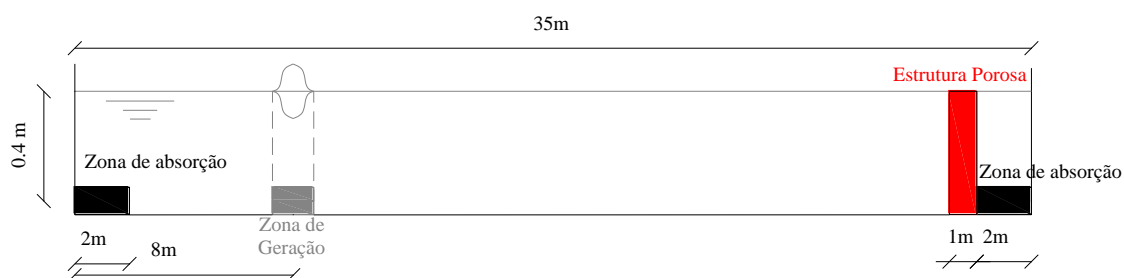


Figura 3. Canal unidimensional.

3.1.2. Apresentação e análise de resultados

Os resultados apresentados são:

- Elevação da superfície livre nos instantes, $t = 16s, 18s, 20s, 22s$ e $24s$;
- Decomposição da onda incidente e reflectida no instante $t = 40s$;
- Onda reflectida para os vários valores de porosidade no instante $t = 40s$;
- Coeficiente de reflexão calculado para as várias porosidades.

Analisando os instantes que se seguem à onda atingir a extremidade direita do domínio, pode ver-se a onda a ser reflectida para o interior do domínio, Figura 4.

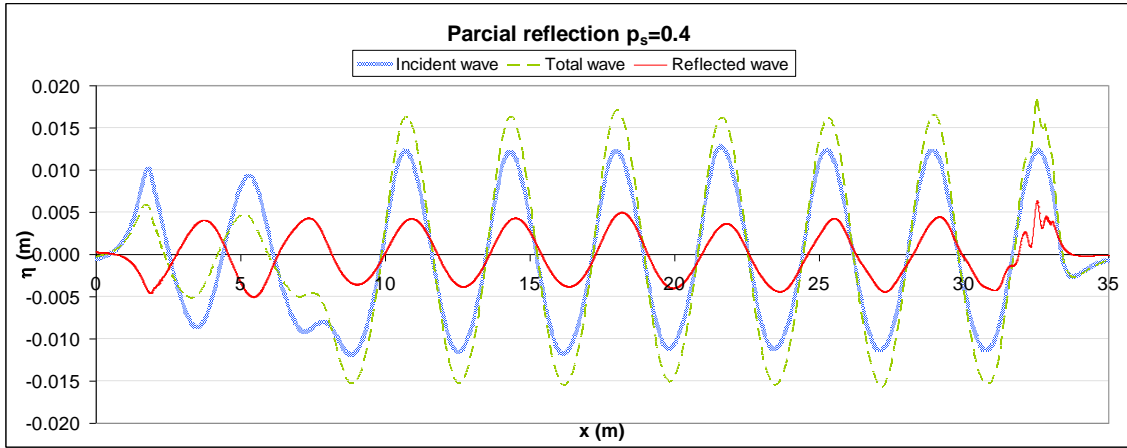


Figura 4. Onda nos instantes em que atinge a extremidade ($t = 16s, 18s, 20s, 22s$ e $24s$) para $p_s = 0.4$.

Para extrair a onda reflectida, a onda incidente é subtraída à onda registada. A onda incidente corresponde à onda obtida com absorção total ($p_s = 1$), Figura 5.

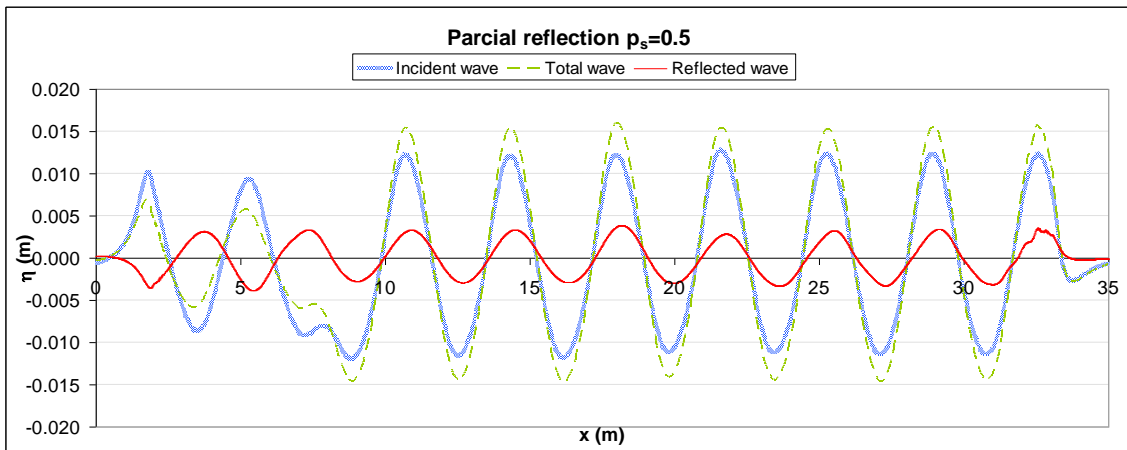


Figura 5. Onda total, incidente e reflectida no instante $t = 40 s$ para $p_s = 0.5$.

O mesmo procedimento é utilizado para obter a onda reflectida nos casos de $p_s = 0, 0.4, 0.5, 0.75$ e 0.9 . Na Figura 6 observa-se a amplitude da onda reflectida a decrescer com o aumento da porosidade da estrutura.

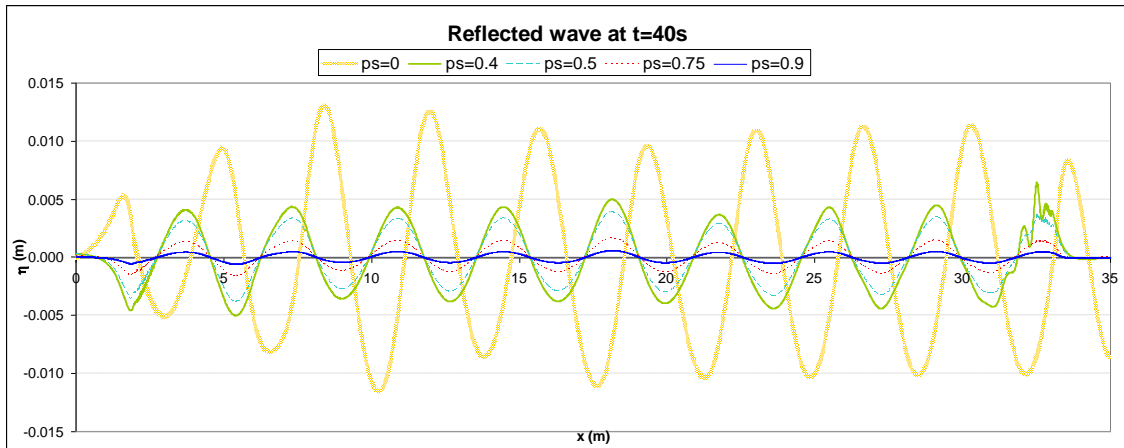


Figura 6. Onda refletida no instante $t = 40$ s para $p_s = 0, 0.4, 0.5, 0.75$ e 0.9 .

De modo a validar o modelo, as fórmulas empíricas propostas por Seeling e Ahrens (1995) são utilizadas para determinar os coeficientes de reflexão associados a quebra-mares porosos. Na Figura 7 e Tabela 1 encontram-se definidos os parâmetros utilizados neste caso de estudo.

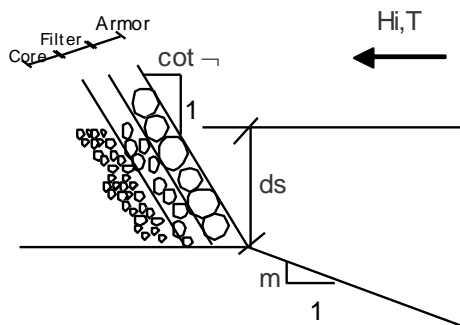


Figura 7. Parâmetros da estrutura (adaptado de Seeling & Ahrens (1995)).

Tabela 1 – Parâmetros da estrutura reflectora.

Parâmetro	Valor utilizado	Descrição
$\cot(\square)$	1.00	Declive da estrutura
D_{n50}	1.24 m	Diâmetro do material do manto
N	2	N. de camadas do manto
d_s	0.40 m	Altura de água a pé de dique
T_p	2.00 s	Período de pico
H_o	0.02 m	Altura de onda
m	0.00	Inclinação do fundo
p_s	varia	Porosidade

Para cada valor de porosidade testado foi obtido o coeficiente de reflexão, K_r , utilizando as fórmulas empíricas de Seeling e Ahrens e, no caso dos resultados numéricos, é tomado o valor da altura significativa no ponto $x = 25.5$ m (HS_{p_s}) e o coeficiente é dado por:

$$K_r = \frac{(HS_{ps} - HS_1)}{HS_1} \quad (15)$$

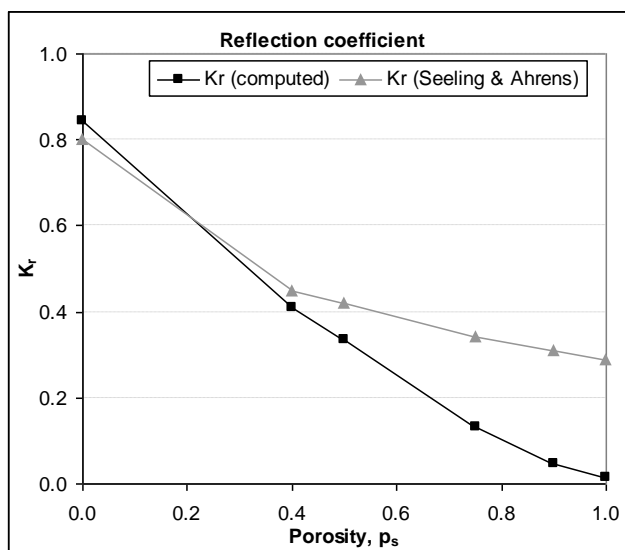


Figura 8. Coeficientes de reflexão obtidos pelo modelo e calculados pelas fórmulas empíricas.

Na Figura 8 apresenta-se a comparação entre os coeficientes obtidos pelo modelo numérico e calculados pelas fórmulas empíricas. Os resultados são bastante aproximados para porosidades entre 0.3 e 0.6. Para valores inferiores a 0.3, o modelo numérico não é capaz de lidar com a estrutura altamente reflectora e ocorrem problemas de instabilidade numérica. Note-se que o valor obtido para $p_s = 0$ resulta da aplicação da condição de fronteira de reflexão total e não faz uso das zonas de porosidade nem de absorção. Para valores superiores a 0.6, os resultados numéricos afastam-se significativamente dos resultados teóricos. Tal é consequência do facto das fórmulas empíricas já se encontrarem fora do seu domínio de aplicabilidade, o que explica a disparidade dos coeficientes para porosidades altas.

3.2. Porto de Vila do Porto

Vila do Porto localiza-se na costa sudoeste da ilha de Santa Maria. Esta ilha pertence ao “grupo oriental” e é a ilha situada mais a sul do arquipélago dos Açores, a cerca de 85 km a sul de São Miguel. Com 18 km de comprimento, cerca de 10 km de largura e uma superfície aproximada de 97 km², caracteriza-se por ter uma zona costeira predominantemente abrupta, recortada por profundas baías e enseadas (ver Figura 9).



Figura 9 – Ilha de Santa Maria. Foto aérea da zona do porto antes da construção do núcleo de recreio. Foto do novo núcleo de recreio.

O porto de Vila do Porto está protegido a Sul por um quebra-mar de talude, cujo intradorso serve de cais para navios, em frente existe outro cais para ferries. Recentemente foi construído

um novo quebra-mar para proteger uma marina de recreio (Figura 9). Várias configurações para o novo quebra-mar foram testadas nos referidos ensaios em modelo reduzido. A configuração antes da construção da nova marina será a testada neste trabalho, Figura 10. Os coeficientes de reflexão das fronteiras são definidos de acordo com as características dos elementos que as constituem.



Figura 10 – Porto de Vila do Porto. Cais ferry: Rampa e Extremidade Nascente. Localização do núcleo de recreio.

3.2.1. Ensaios em modelo físico

O LNEC efectuou estudos de agitação em modelo físico, Fortes *et al.* (2006), de modo a avaliar as implicações da construção do núcleo de recreio na agitação marítima no interior do porto de Vila do Porto e as condições de abrigo no interior desse núcleo de recreio.

Os ensaios foram realizados num tanque de ondas irregulares do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC, com uma área aproximada de 650 m². Foi utilizado um gerador de ondas irregulares, cuja pá tem 6 m de comprimento e 0.80 m de altura. O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:55.

Nos ensaios em modelo físico, foram testadas seis configurações portuárias, que correspondem à situação actual sem marina, Figura 11, e com a futura marina, considerando diferentes configurações para esta.

Para cada uma das configurações, foram testados três rumos de incidência – SW, S e SE. Para cada rumo, efectuaram-se ensaios com um nível de maré (nível de preia-mar de +2.0m ZH), com três períodos (8 s, 11 s e 15 s) e dois valores de altura de onda (2 m e 5 m). Os ensaios foram realizados três vezes, de modo a confirmar os resultados obtidos.

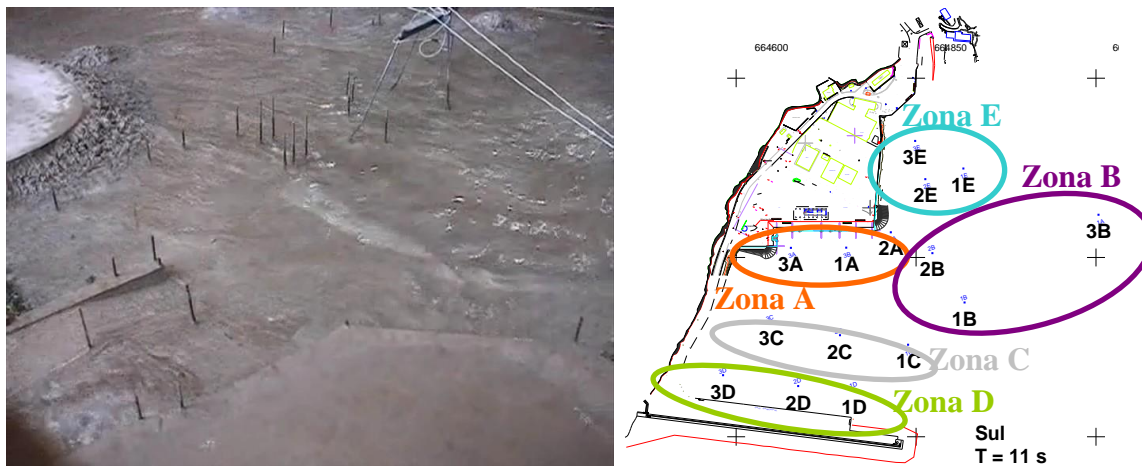


Figura 11 – Aspecto geral do ensaio em modelo físico sem o núcleo de recreio. Pontos de medição no interior do porto de Vila do Porto e zonas definidas para comparação de resultados.

Para todos os ensaios, foram seleccionados 15 pontos nos quais foram registadas as características da agitação marítima. Para além destes pontos, foi também considerado um ponto em frente ao gerador, onde se efectuou a medição da agitação marítima gerada.

Foram definidas 5 zonas distintas para comparação de resultados:

- Zona A – Em frente ao cais ferry.
- Zona B – Fora da zona abrigada do Porto.
- Zona C – No interior do Porto.
- Zona D – Em frente ao cais de navios.
- Zona E – Na zona da futura marina de recreio.

Nos 15 pontos, foram colocadas sondas de medição da agitação marítima e efectuada a respectiva calibração.

Com base nos registos obtidos nos 15 pontos localizados no interior da bacia portuária e no ponto em frente ao gerador de ondas, foram calculados índices de agitação, para cada condição de agitação ao largo. Os índices de agitação, H/H_0 , são dados pela relação entre a altura de onda medida em cada ponto e a altura de onda medida no ponto à saída do gerador de ondas, em cada ensaio.

Para simplificar a análise de resultados, efectuou-se, em cada ponto de medição, a média dos valores dos índices de agitação obtidos no ensaio, na 1ª repetição e na 2ª repetição.

3.2.2. Condições de cálculo do modelo numérico

Testou-se apenas uma das configurações portuárias ensaiadas em modelo físico, a configuração sem marina.

Os cálculos de agitação com o modelo numérico foram realizados para algumas das condições de agitação incidente ensaiadas em modelo físico, nomeadamente, para a onda incidente de direcção de onda de S e período de 11 s. O nível de maré correspondeu ao nível de preia-mar, à cota +2.0 m (Z.H.). A altura de onda é igual a 2.0m.

O passo de tempo utilizado foi de 0.01 s, o que origina números de Courant que variam na malha entre 0.04 e 0.08. Utilizou-se um parâmetro de difusão artificial, γ , igual a 5.49×10^{-6} m²/s, definido após vários testes preliminares. O tempo total de cálculo foi de 200 s.

A batimetria da zona em estudo é apresentada na Figura 12.

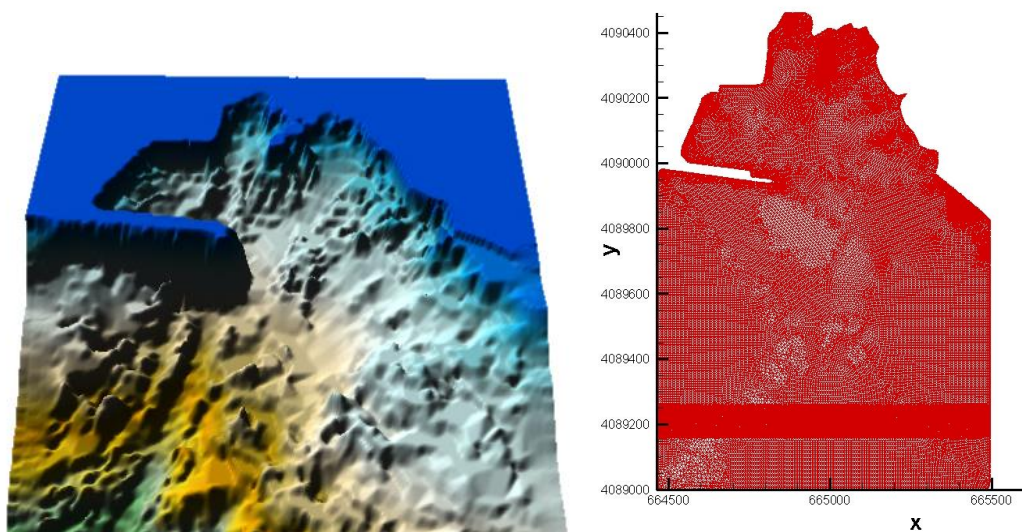


Figura 12 – a) Batimetria do domínio; b) Malha de elementos finitos.

O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 44 167 nós e 87 196 elementos.

A construção desta malha de elementos finitos foi realizada com o programa GMALHA, Pinheiro *et al.* (2007). A densidade de nós da malha deve ser tal que assegure a estabilidade do método, por um lado, e a qualidade dos resultados, por outro. Para tal, foi definido uma média de 23 pontos por comprimento de onda em todo o domínio, para um período de 11 s. A área dos elementos varia entre 1.07 m² e 75.42 m², correspondendo às zonas menos (cerca de 2 m) e mais profundas (cerca de 30 m), respectivamente. O GMALHA assegura uma renumeração da malha de modo a minimizar a largura de banda, que nesta malha resultou numa largura de banda de 314, isto é, a numeração nodal de cada elemento nunca ultrapassa esta diferença, em toda a malha.

Na Figura 14 ilustra-se a fronteira do domínio e a localização das zonas absorventes e da zona de geração das ondas. A zona de geração localiza-se na ordenada $y = 4089200$ m e tem uma largura de 27.3 m. As zonas absorventes têm uma largura de 1.5 vezes o comprimento de onda, isto é, 164 m.

Para as condições de agitação incidente atrás referidas, efectuaram-se os cálculos de ondas regulares com o modelo BOUSS3W. Três casos distintos foram simulados para avaliar a influência da utilização de reflexão parcial nas fronteiras físicas: Caso A – fronteiras C a K com absorção total; Caso B - fronteiras C a K (excepto E e F) com reflexão total; e o Caso C - fronteiras C a L com reflexão parcial, ver Figura 13a.

Impuseram-se condições de fronteira de absorção total ao troço A pois situa-se a montante da função fonte e absorverá, deste modo, as ondas reflectidas no domínio. Nas fronteiras B e M, que são fronteiras não físicas do domínio, impôs-se a condição de reflexão total. Quanto aos restantes troços, C a L, para o caso C, impuseram-se condições de reflexão parcial (que incluem uma zona porosa e outra absorvente junto á fronteira em causa, ver Figura 13b) para simular: C – zona rochosa; D – praia dissipativa; E, F, H e J – Cais de parede vertical; G e I – enrocamento; K – cubos de betão e L – tetrápodes de betão. As condições de fronteira encontram-se sumarizadas na tabela 2. O cálculo dos coeficientes de reflexão foi efectuado de acordo com Seeling e Ahrens (1995).

Tabela 2 – Condições de fronteira

Troço	Tipo	Coeficientes de reflexão		
		Caso A	Caso B	Caso C
A	mar	0	0	0
B	mar	1	1	1
C	rochas	0	1	0.39
D	praia	0	1	0.34
E	cais vertical	0	0	0.9
F	cais vertical	0	0	0.9
G	enrocamento	0	1	0.68
H	cais vertical	0	1	0.9
I	enrocamento	0	1	0.68
J	cais vertical	0	1	0.9
K	cubos betão	0	1	0.6
L	tetrápodes	1	1	0.6
M	mar	1	1	1

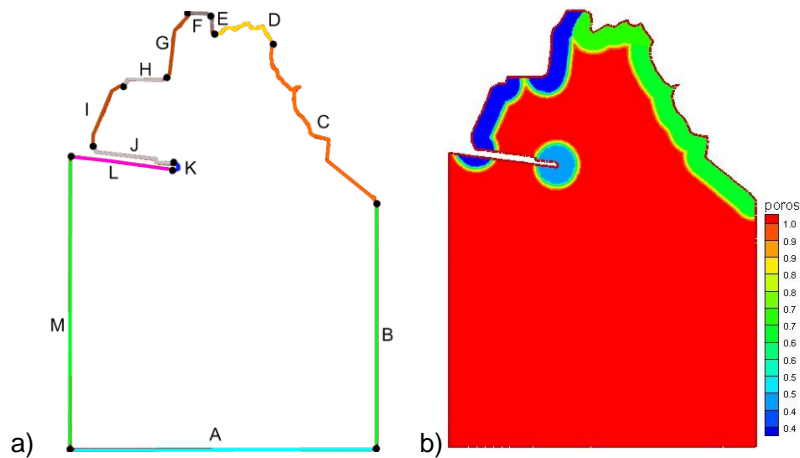


Figura 13 – a) Fronteira do domínio e divisão por troços com características diferentes; b) Distribuição da porosidade no caso C.

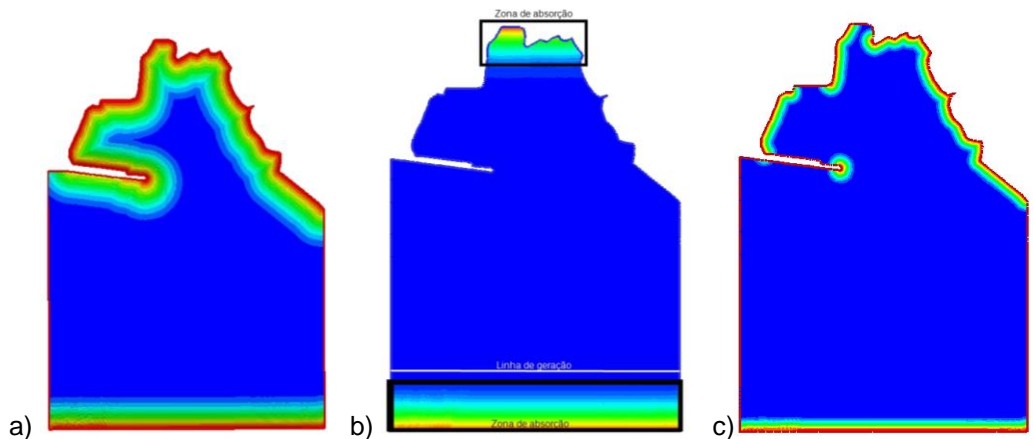


Figura 14 –a) Localização das zonas absorventes (Caso A); b) Localização da linha de geração de ondas e das zonas absorventes (Caso B); c) Localização das zonas absorventes (Caso C).

3.2.3. Apresentação e análise de resultados

Na Figura 15 apresentam-se os valores da elevação da superfície livre ao fim de 200 s de simulação para os três casos simulados. Esta figura mostra as alterações na onda devido aos efeitos da refração do fundo, da difração da onda em torno do molhe do porto e das reflexões nas fronteiras sólidas desse domínio.

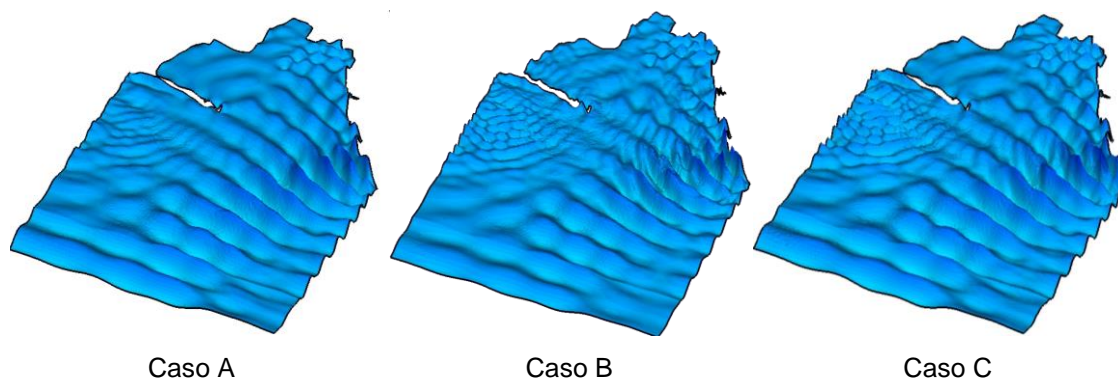


Figura 15 – Elevação da superfície livre no instante $t = 200$ s de simulação.

Na Figura 16 apresentam-se as isolinhas dos índices de agitação em todo o domínio, ao fim de 200 s de simulação.

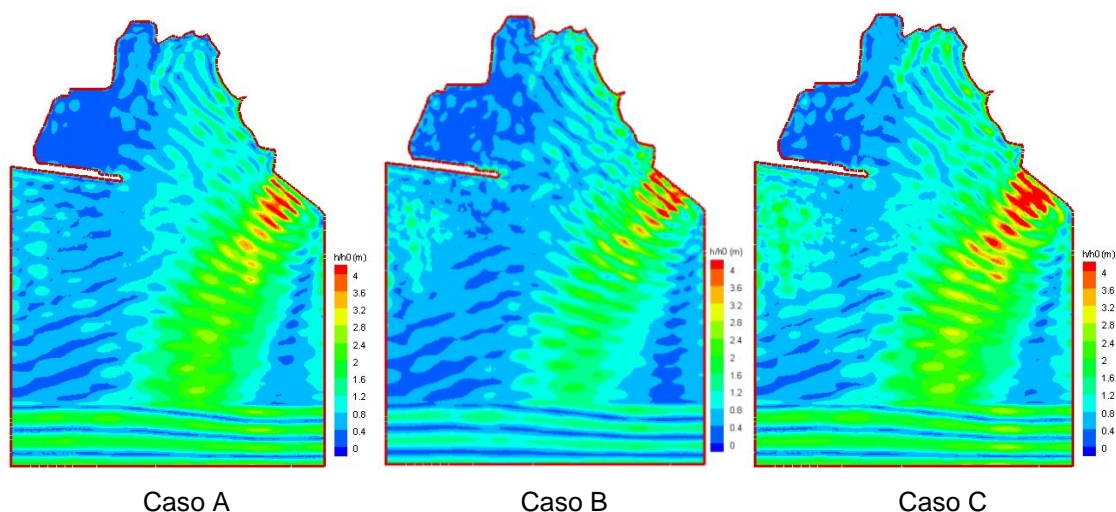


Figura 16 – Índices de agitação em todo o domínio.

A agitação marítima sofre uma redução à medida que se propaga para o interior do porto. Esta redução é devida à difração em redor do molhe principal. No entanto, existem zonas no interior do porto, com valores do índice de agitação mais elevados devido à existência de reflexões. Tal ainda é mais notório quando se passa do Caso A para o Caso B em que se passa de fronteiras totalmente absorventes para reflexão total e o inverso do caso B para o caso C, pois neste último as fronteiras passam a ter maiores valores dos coeficientes de absorção.

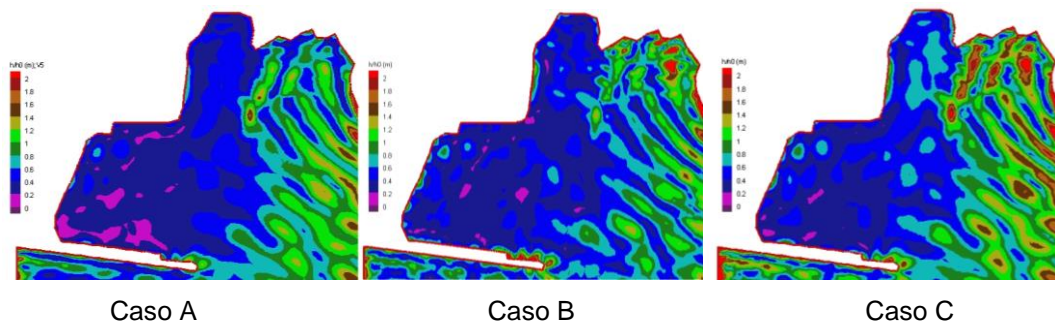


Figura 17 – Índices de agitação no interior do porto.

Na Figura 17 constata-se que os valores do índice de agitação mais elevados se verificam em frente à zona rochosa lateral direita (fronteira C, ver Figura 14) podendo atingir valores de índice de agitação superiores a 3.0. A zona de entrada do porto é caracterizada por valores do índice de agitação próximos da unidade e à medida que se entra na parte abrigada do porto os índices diminuem para ordens de grandeza de 0.2 a 0.5. No entanto, devido às reflexões entre os dois cais verticais, existem locais no interior do porto com valores mais elevados do índice de agitação.

Na Figura 18 apresentam-se os valores experimentais e numéricos dos índices de agitação nos 15 pontos no interior do porto. Os resultados experimentais resultam das medições efectuadas nas sondas. Os resultados numéricos correspondem a uma média dos resultados obtidos num raio de 20 m em torno de cada ponto definido. Na Figura 19 apresentam-se as médias dos mesmos índices nas cinco zonas definidas e na totalidade dos pontos.

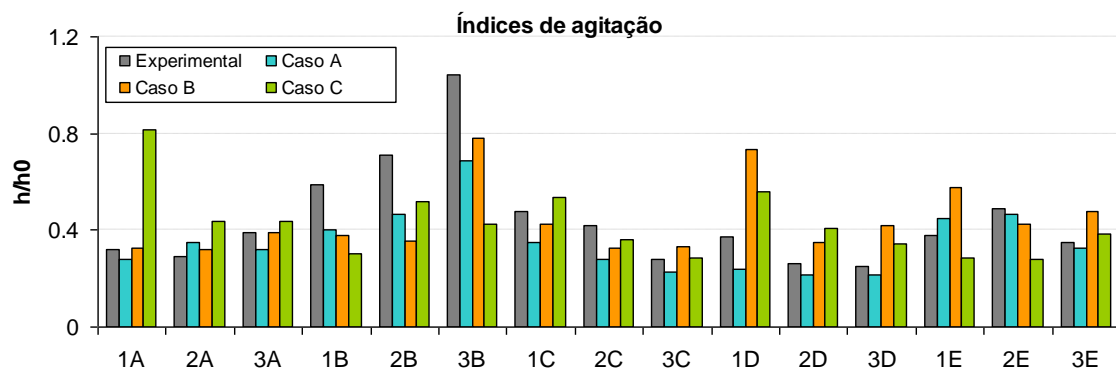


Figura 18 – Índices de agitação numéricos e experimentais médios (H/H_0).

Na maioria dos pontos em estudo das zonas A, C e E, os resultados numéricos e experimentais são semelhantes. No entanto, nalguns pontos, ocorrem diferenças significativas que estão relacionadas com limitações quer do modelo numérico quer do modelo físico. As maiores diferenças registam-se em pontos das zonas B e D.

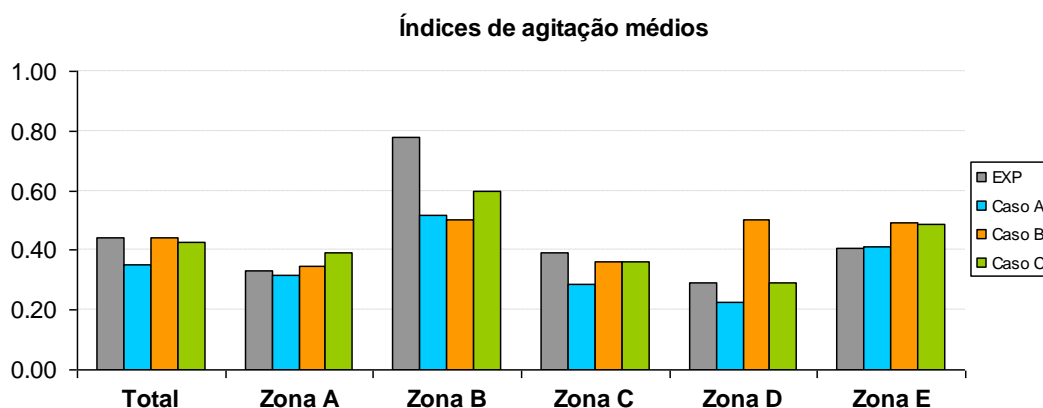


Figura 19 – Índices de agitação numéricos e experimentais médios por zonas (H/Ho).

Em termos médios verifica-se ainda que os resultados numéricos são um pouco superiores aos experimentais nas zonas A, D e E enquanto nas zonas B e C ocorre o contrário.

Para a comparação dos resultados numéricos com resultados experimentais, são considerados, nesta comunicação, três parâmetros estatísticos (Willmott *et al.* 1985). São eles o índice de concordância, ic , o erro médio quadrático (RMSE) e o erro médio absoluto (bias), dados pelas equações:

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2}, \quad rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (3)$$

onde x_i são os valores experimentais (referência), y_i são os valores dos modelos numéricos, \bar{x} é a média do valor experimental e n é o número de pontos. O índice de concordância varia de zero a um, sendo que quanto maior é o valor, maior é a concordância dos valores numéricos com os experimentais.

Na Figura 20 e na Figura 21 apresentam-se o RMSE e o bias nas diferentes zonas do porto.

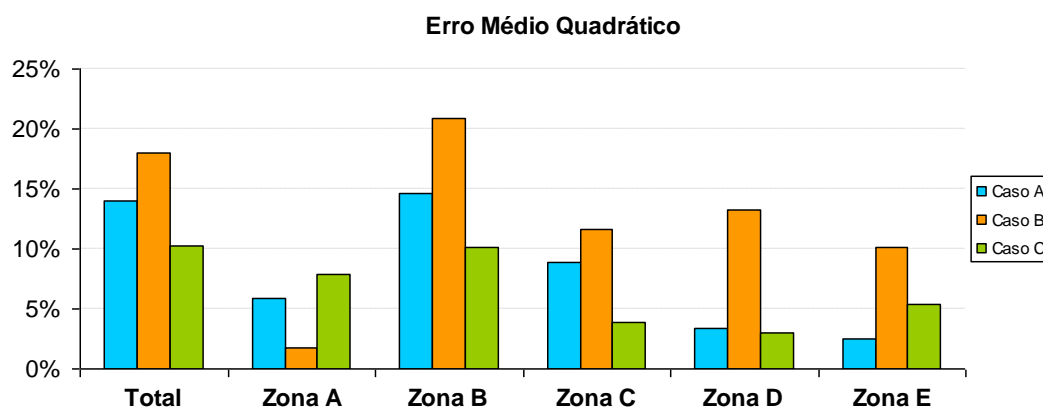


Figura 20 – Erro médio quadrático dos índices de agitação numéricos face aos experimentais.

O erro médio quadrático é de cerca de 14% no caso A, 18% no caso B e 10% no caso C, sendo logo evidente que o caso C (com condições de fronteira de reflexão parcial) é o que mais se aproxima dos resultados experimentais. Isto é também verdade se olharmos para as zonas

B, C e D. No entanto, as zonas A (em frente ao cais ferry) e E (futura marina) o mesmo não acontece. Na zona A, o caso B (reflexão total) é o que se aproxima mais enquanto na zona E é o caso A (absorção total) que se aproxima mais. Tal indicia que no Caso C que os coeficientes utilizados estão subestimados na zona do interior do porto, enquanto que estão sobrestimados na zona da praia. Uma análise de sensibilidade a variação desses coeficientes de reflexão nessas zonas seria conveniente para o comprovar.

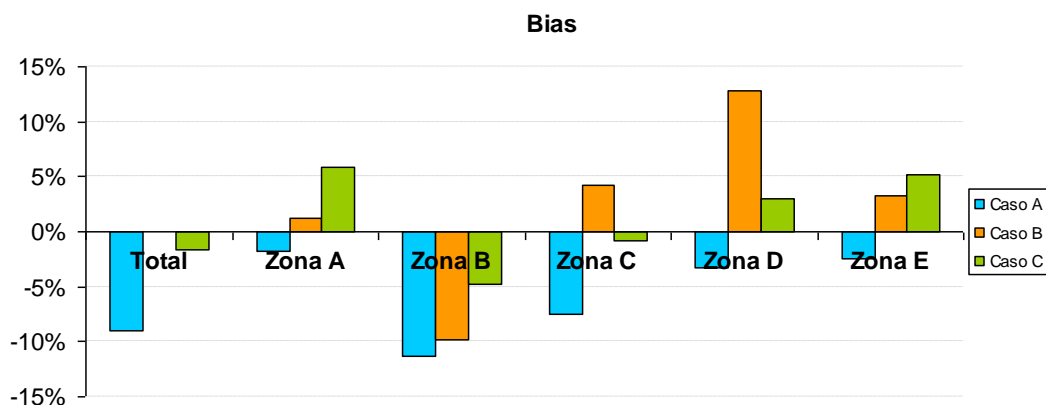


Figura 21 – Erro médio absoluto dos índices de agitação numéricos face aos experimentais.

O parâmetro *bias* indica o mesmo mas de modo absoluto. Como era de esperar o caso A subestima sempre os valores enquanto o caso B os sobrestima, excepto na zona B. Isto deve-se ao facto de se ter aplicado uma zona de absorção total na praia que tem um efeito amenizador na agitação desta zona.

O índice de concordância foi calculado para a totalidade das sondas e foram obtidos os valores de 0.636, 0.818 e 0.902, respectivamente para os casos A, B e C, Figura 22.

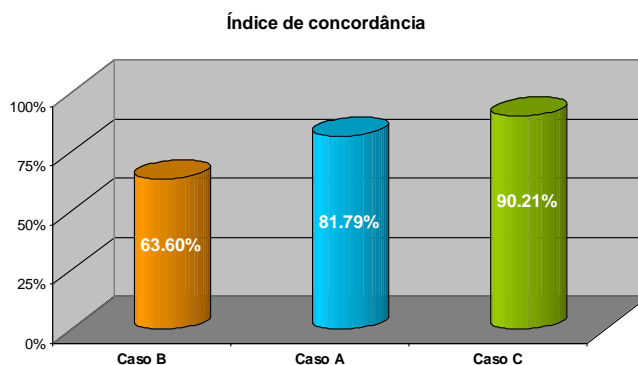


Figura 22 – Índice de concordância dos resultados numéricos face aos experimentais calculado para a totalidade das sondas.

Este parâmetro vem provar que o modelo BOUSS3W viu a sua performance melhorada com esta nova condição de fronteira de reflexão parcial. Passando de entre 60% e 80% para uma concordância da ordem dos 90%. Um ajustamento mais cuidadoso dos coeficientes aplicados em cada troço pode melhorar ainda mais este valor.

Deve ter-se em atenção que existirão sempre diferenças entre o modelo numérico e físico que estão relacionadas com diversos factores, nomeadamente:

- O modelo numérico não simula a rebentação das ondas, pelo que os valores da agitação nas zonas muito pouco profundas não são representativos da realidade;

- O modelo BOUSS3W tem uma difusão artificial de modo a poder controlar as instabilidades numéricas, o que diminui a altura de onda à medida que esta se propaga;
- A batimetria dos modelos numérico e físico não é exactamente a mesma devido a limitações quer de espaço quer construtivas do modelo físico;
- No modelo físico, os aparelhos de medição (sondas resistivas) apresentam também limitações principalmente em zonas onde as alturas de onda são pequenas uma vez que a sensibilidade das sondas de medição é reduzida.

4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se o modelo BOUSS3W resultante do aperfeiçoamento do modelo de elementos finitos de propagação de ondas, BOUSS, desenvolvido por Walkley (1999) que é baseado nas equações de Boussinesq estendidas por Nwogu (1993). Uma nova condição de fronteira de reflexão parcial foi implementada no modelo numérico e baseia-se no trabalho de Nwogu e Dermirbilek (2001). Esta nova condição de reflexão parcial é objecto de validação num caso de teste simples (unidimensional) e também numa bacia portuária real e com características complexas.

Os coeficientes de reflexão obtidos no caso unidimensional são comparados com fórmulas empíricas e verificou-se que a nova condição de reflexão parcial conseguiu reproduzir de forma satisfatória o fenómeno pretendido. De facto a energia da onda é absorvida parcialmente e tanto mais quanto maior é a porosidade definida.

O caso real escolhido foi o porto de Vila do Porto, na ilha se Santa Maria nos Açores. Os resultados do modelo numérico, i.e., os índices de agitação em 15 sondas são comparados com resultados experimentais. Os parâmetros estatísticos erro médio absoluto, erro médio quadrático e índice de concordância foram utilizados para quantificar essas comparações. Em termos gerais, verificou-se que o modelo numérico conseguiu reproduzir o comportamento e a ordem de grandeza dos resultados experimentais, simulando bem a maioria das transformações das características das ondas ao longo da sua propagação no domínio de geometria e batimetria complexos, como é este caso desta bacia portuária.

O modelo BOUSS3W bidimensional apresentou, de forma geral, bons resultados, embora seja introduzida uma difusão numérica artificial para controlar as oscilações numéricas. No entanto, existem diferenças entre resultados numéricos e experimentais, especialmente nas zonas próximas do quebra-mar principal. O modelo BOUSS3W viu a sua performance melhorada com esta nova condição de fronteira de reflexão parcial. Passando de índices de concordância entre 60% e 80% para valores da ordem dos 90%.

Deve notar-se que este método pode ser utilizado para simular não só a reflexão mas também transmissão de ondas por estruturas não contíguas às fronteiras, como por exemplo o caso dos quebra-mares destacados ou outras estruturas inseridas no interior do domínio.

O modelo BOUSS3W apresenta capacidades para ser utilizado em estudos de engenharia costeira e portuária e de modo a alargar ainda mais as potencialidades de aplicação deste modelo, prevê-se a inclusão dos fenómenos de atrito de fundo e de rebentação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Administração Portuária das Ilhas de São Miguel e Santa Maria pela autorização da publicação dos resultados do estudo em modelo físico de agitação do porto de Vila do Porto. Os autores agradecem o financiamento da FCT através de PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006.

REFERÊNCIAS

Berzins M., Furzeland R.M., Scales L.E. (1985) A user's manual for SPRINT -a versatile

software package for solving systems of algebraic, ordinary and partial differential equations: Part 3 - advanced use of SPRINT. Technical Report TNER.85.058, Thornton Res. C, Chester.

- Engelund, F.A. (1953) On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. Danish Academy of Technical Sciences.
- Fortes C. J., Pinheiro L., Silva L.G., Sousa I. (2006) Vila do Porto Harbour. Numerical and Experimental Tests. ISOPE - The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, 28 de May - 2 June.
- Nwogu, O. (1993) Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119(6), pp. 618-638.
- Nwogu, O. e Demirbilek, Z. (2001) BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors. Report 1 Theoretical Background and User.s Manual, ERDC/CHL TR-01-25, U.S. Army Corps of Engineers
- Pinheiro L., Fortes C.J., Santos J.A., Walkley, M. (2009) Implementation of partial reflection boundary conditions in wave propagation model BOUSS3W ICS 2009.
- Pinheiro, L., Fernandes, J.L.M., .Fortes, C.J. E.M. (2007a) Finite Element Mesh Generator with Local Density Conditioned to Bathymetry for Wave Propagation Models in Coastal Zones. Proc. of EUA4X@IAC 06, Roma Italy, October 2006. IMACS Series in Comp.and Applied Mathematics Vol.12, pp71-80.
- Pinheiro, L., Palha, A., Fortes, C. and Walkley (2007b) Internal wave generation on finite element model BOUSS1D_iw: comparison with experimental data. Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Lisbon, Portugal, July 1-6, 2309-2316.
- Seeling, W.N. and J.P. Ahrens (1995) Wave forces on inclined and vertical structures. ASCE, pp.28-55.
- Walkley M. A (1999) Numerical Method for Extended Boussinesq Shallow-Water Wave Equations. PhD Thesis, The University of Leeds School of Computer Studies.
- Wei, G., Kirby, J. T., Sinha, A. (1999) Generations of waves in Boussinesq models using a source function method, Coastal Eng., 36(4), 271-299.
- Willmott, C.J., S.G. Ackleson, R.E. Davis, J.J. Feddema, K.M. Klink, D.R. Legates, J. O'Donnell e C.M. Rowe (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, 90 (c5), p. 8995-9005