



ESTUDOS DE AGITAÇÃO E RESSONÂNCIA EM MODELO MATEMÁTICO

Conceição J. E. M. Fortes, José M. Afonso Covas

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
Tel:+351.21.8443446; Fax:+351.21.8443019; Email: jfortes@lnec.pt, acovas@lnec.pt

Sumário

Nesta comunicação, refere-se, em geral, a experiência do LNEC no estabelecimento e exploração de modelos matemáticos determinísticos de propagação e deformação de ondas marítimas em zonas costeiras.

Descreve-se, com pormenor, o modelo numérico de elementos finitos DREAMS, Fernandes (1990) e Fortes (1993), baseado na equação elíptica de *mild-slope*, Berkhoff (1972). Esta equação tem em conta os efeitos combinados da refração e difração de ondas monocromáticas quando se propagam em fundos de declive suave.

O modelo DREAMS pode ser aplicado em estudos, quer de penetração da agitação marítima de período curto num porto, quer de ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidentes.

São apresentados exemplos da aplicação do modelo DREAMS em estudos de caracterização da agitação marítima em portos da costa Portuguesa. Estes exemplos ilustram as potencialidades deste modelo como ferramenta auxiliar do projecto de obras portuárias ou costeiras.

1. Introdução

O conhecimento da evolução das ondas marítimas na sua propagação desde o largo até à costa é de fundamental importância para o dimensionamento e verificação de critérios de estabilidade de estruturas de protecção costeira, para estimar o transporte de sedimentos e a consequente modificação dos fundos, para analisar o comportamento de navios amarrados ou em manobra, ou seja, para os estudos de engenharia portuária e costeira em geral.

No decurso da propagação, as ondas podem sofrer os efeitos de diversos fenómenos físicos, dos quais se salientam os associados à variação da profundidade, à transmissão de energia ao longo da crista da onda, à ocorrência de rebentação, à dissipação de energia por atrito de fundo, à reflexão total ou parcial e à existência de obstáculos. Torna-se, assim, importante ter um modelo matemático que leve em conta os efeitos destes fenómenos, de modo a prever as características das ondas para estudos de engenharia portuária e costeira.

As primeiras abordagens numéricas incidiram unicamente sobre o fenómeno da refração, sendo os modelos desenvolvidos especialmente indicados para estudar as transformações da onda devidas unicamente à variação da profundidade. Estes modelos baseiam-se normalmente, no método do raio de onda e utilizam as diferenças finitas para a resolução das equações. Do ponto de vista computacional, são modelos rápidos e económicos e a sua aplicação é principalmente vantajosa em problemas de propagação de ondas em que a área envolvida é de grandes dimensões.

Neste domínio, o LNEC dispõe de um modelo matemático de refração de ondas regulares – o modelo REFRACT, Covas (1971, 1977 e 1981a) – que se apoia nas equações do raio de onda e do coeficiente de afastamento de ortogonais. Os principais dados a fornecer ao modelo são os valores do rumo ao largo e do período das ondas monocromáticas a estudar, os níveis de maré e os valores das cotas do fundo nos nós de uma quadrícula. Os resultados respeitantes a cada onda monocromática são constituídos pelos desenhos dos diagramas de

refracção e pelos valores das principais grandezas características, referentes a esses diagramas. Este modelo foi utilizado em variadíssimos estudos dos quais se salientam os estudos de agitação nas zonas marítimas adjacentes ao porto de Sines, Covas (1980a), ao porto de Sesimbra, Covas (1980b), à Baía de Cascais, Covas (1988), e ao Aeroporto Internacional de Macau, Covas (1989b).

As principais limitações do modelo estão associadas a algumas das hipóteses de base do seu desenvolvimento, nomeadamente no que se refere à utilização da teoria das ondas de pequena amplitude, ou teoria linear, e à não consideração de qualquer mecanismo de transmissão lateral de energia (difracção). Com efeito, o modelo REFRAC deixa de ser válido em zonas onde a batimetria favoreça o aparecimento de cáusticas (zonas de convergência) - onde o efeito da difracção é importante - ou em regiões onde, por via da existência de obstáculos à propagação da onda, os efeitos conjuntos da difracção e da reflexão são importantes (como acontece, por exemplo, em portos ou zonas abrigadas).

Para zonas portuárias ou zonas abrigadas, foram então desenvolvidos modelos matemáticos que têm em conta os efeitos da difracção e da reflexão mas pressupõem que a inclinação do fundo é tão suave (profundidade aproximadamente constante) que não existe influência da variação da profundidade nas ondas de superfície. A sua aplicação está condicionada portanto a áreas muito pequenas, nas quais ocorram profundidades relativamente uniformes.

Neste domínio, no LNEC, foram desenvolvidos os modelos numéricos lineares de difracção-reflexão, DIFRA1 e DIFRA2, Covas (1981b, 1983 e 1985b), e DIFRES, Covas (1992a), que permitem efectuar cálculos de agitação em zonas portuárias ou abrigadas.

Os modelos DIFRA1 e DIFRA2, Covas (1981b, 1983 e 1985b), permitem efectuar cálculos de agitação - difracção e reflexão - em portos abrigados por um único molhe ou por dois molhes com uma orientação relativa qualquer. A agitação, em cada ponto do porto, resulta da sobreposição da onda difractada pelas obras portuárias exteriores (que atinge directamente o ponto considerado) e das ondas difractadas que atingem o ponto em causa após uma ou duas reflexões nas obras portuárias interiores. O cálculo da difracção é clássico, enquanto que o da reflexão é feito pelo método das imagens. No caso de dois molhes com uma orientação relativa qualquer, o cálculo da difracção provocada pelo molhe interior tem em linha de conta que a onda que o atinge sofreu já um fenómeno de difracção provocado pelo molhe exterior.

Os principais dados a fornecer são os referentes à geometria do porto e respectivos coeficientes de reflexão, o período e a direcção de propagação da onda à entrada do porto e o nível de maré a usar nos cálculos. Os resultados dos modelos são constituídos por isolinhas dos valores do índice de agitação e linhas de igual fase (cristas das ondas). Os modelos DIFRA1 e DIFRA2 foram utilizados, por exemplo, nos estudos de agitação dos portos de Sesimbra, Covas (1980c), e Praia da Vitória nos Açores, Covas (1982a), na bacia de manobra do porto da Horta nos Açores, Covas (1982b), e na Marina de Sables d'Or em Marrocos, Covas (1985a). As principais limitações destes modelos, para além das inerentes à formulação linear, relacionam-se com o facto de só permitirem a realização de estudos de agitação em portos de formas muito simples e de profundidade aproximadamente constante.

O modelo de elementos de fronteira DIFRES, Covas (1992a), calcula a penetração da agitação de período curto num porto de forma arbitrária e a ressonância de uma bacia portuária sob a acção de ondas de longo período nela incidentes. É baseado na equação de Helmholtz pelo que teoricamente deveria ser aplicado apenas a regiões de profundidade constante. No entanto, a variação de profundidade pode ser introduzida através da divisão da região em estudo num conjunto de bacias, cada uma com profundidade constante.

Os principais dados a fornecer são: a geometria dos elementos de fronteira com que foi discretizado o contorno de cada uma das bacias em que se dividiram as zonas do interior e exterior do porto; os coeficientes de reflexão e as características geométricas dos troços dos contornos interior e exterior do domínio de cálculo (constituídos por fronteiras laterais sólidas total ou parcialmente reflectoras); as características da onda incidente; e o nível de maré. Os resultados do modelo são apresentados sob forma gráfica podendo representar-se as isolinhas do índice de agitação ou do coeficiente de amplificação, as cristas das ondas ou os

movimentos horizontais da superfície livre. O modelo DIFRES foi utilizado nos estudos de agitação e ressonância do porto de recreio de Saint Quay-Portrieux, Covas (1989a), e nos estudos de ressonância do porto da Baleeira, Covas (1992b).

A principal limitação do modelo DIFRES resulta de este modelo incluir o fenómeno de refacção de forma aproximada apenas, ao considerar a bacia portuária dividida num conjunto de bacias de profundidade constante.

Para colmatar esta dificuldade, foi desenvolvido o modelo de elementos finitos DREAMS que simula a propagação e deformação de ondas marítimas em fundos de inclinação suave, tendo em conta os efeitos combinados dos fenómenos de refacção e difracção, Fernandes (1990) e Fortes (1993). Este modelo, que foi desenvolvido no âmbito da colaboração entre o Instituto Superior Técnico (IST) e o LNEC, é utilizado com frequência em estudos de agitação e ressonância em zonas restritas (portos, baías, marinas ou zonas abrigadas). Para zonas costeiras de maior dimensão, são normalmente utilizados no LNEC, modelos numéricos semelhantes a DREAMS, mas de diferenças finitas, Kirby e Dalrymple (1994) e Oliveira (1997).

Nas secções seguintes, apresenta-se uma descrição do modelo numérico DREAMS, com referência à equação base do modelo, às condições de fronteira e à aplicação do método dos elementos finitos. Seguidamente, apresentam-se alguns exemplos da aplicação do modelo em estudos de ressonância e agitação em zonas portuárias.

2. Descrição do modelo DREAMS

DREAMS é um modelo matemático de elementos finitos para o cálculo da propagação e deformação de ondas marítimas em zonas costeiras, Fernandes (1990) e Fortes (1993). Este modelo baseia-se na equação elíptica de *mild-slope*, Berkhoff (1972), a qual descreve os efeitos combinados da refacção, da difracção e reflexão de ondas lineares harmónicas propagando-se em fundos de inclinação suave, como os que ocorrem em portos, baías e zonas costeiras. O método numérico utilizado para a resolução da referida equação é o método dos elementos finitos (MEF). As condições de fronteira implementadas no modelo são de vários tipos: radiação, reflexão (parcial ou total) e geração-radiação combinadas.

Trata-se, assim, de um modelo especialmente adequado na simulação da propagação e deformação de ondas marítimas lineares em zonas de fundos de inclinação suave e pode ser aplicado aos estudos de agitação e ressonância de portos, baías ou zonas abrigadas.

A validação do modelo matemático, Fortes (1993), Fortes *et al.* (1993, 1996) e Fortes *et al.* (1997) foi feita com casos de teste clássicos da bibliografia, tais como, o fundo plano inclinado, o baixio circular, os molhes semi-infinitos, a bacia rectangular de Mei e com casos de teste reais. O modelo foi também validado com os estudos de ressonância e agitação no porto de Saint Quay-Portrieux e o estudo da ressonância no porto da Baleeira, tendo sido comparados, para estes casos de teste, os resultados de DREAMS com resultados de outros modelos matemáticos e/ou de modelos físicos.

2.1 Equação de *mild-slope*

Muitos dos processos de transformação de ondas de pequena amplitude podem ser descritos pela equação elíptica de *mild-slope* (equação de declive suave), primeiramente apresentada por Berkhoff (1972) e formalmente deduzida por Smith e Sprinks (1975).

Esta equação é obtida das equações de continuidade e de quantidade de movimento para escoamentos irrotacionais e gravíticos de fluidos perfeitos (fluido homogéneo, incompressível e não-viscoso), considerando a teoria das ondas de pequena amplitude. Admitindo que o fundo é de declive suave, é possível integrar na vertical as anteriores equações (escritas em termos do potencial de velocidade, $\Phi(x,y,z,t)$) e obter a seguinte expressão da equação linear de *mild-slope* para ondas monocromáticas de frequência w .

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla f) + k^2 CC_g f = 0 \quad (1)$$

sendo:

f - o potencial de velocidade, independente da coordenada z e da variável tempo, t , que se relaciona com Φ através de:

$$\Phi(x, y, z, t) = f(x, y) \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (2)$$

C - a velocidade de fase ou celeridade da onda $= \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$;

C_g - a velocidade de grupo $= \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} C \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$;

ω - a frequência angular obtida através da relação de dispersão para ondas de pequena amplitude (teoria linear):

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (3)$$

A equação de *mild-slope* pode também ser expressa em termos da elevação da superfície livre, h , que se relaciona com f através de:

$$h = \text{Re} \left[\frac{i\omega}{g} \left(f(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right) e^{-i\omega t} \right]_{z=0} \quad (4)$$

A introdução de h dado pela Eq. (4) na Eq. (1) permite obter:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla h) + k^2 CC_g h = 0 \quad (5)$$

Trata-se de uma equação elíptica bidimensional de propagação de ondas lineares monocromáticas em fundos de declive suave, que tem em conta os efeitos combinados de refração e difração de ondas de superfície.

Quando a profundidade é constante e kh arbitrário, a Eq. (5) transforma-se na equação de Helmholtz:

$$\nabla^2 h + k^2 h = 0 \quad (6)$$

em que k satisfaz a relação de dispersão dada pela Eq. (3).

Para águas pouco profundas, verifica-se que $C = C_g = \sqrt{gh}$ e, por conseguinte, a Eq. (5) transforma-se na equação linear de águas pouco profundas, dada por:

$$\nabla \cdot (h \nabla h) + \frac{\omega^2}{g} h = 0 \quad (7)$$

A equação de *mild-slope* é válida para ondas de pequena amplitude, números de Ursell pequenos, $U_r \ll 1$ e tem por base a hipótese de declive suave, $(|\nabla h|/kh) \ll 1$.

Booij (1983) verificou que a equação de *mild-slope* pode ser aplicada em zonas de declive até 1:3, o que permite a sua utilização na generalidade dos domínios costeiros.

2.2 Condições de fronteira

As condições de fronteira implementadas no modelo DREAMS são:

- ❖ condição de radiação que permite a saída de perturbações propagantes geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito;
- ❖ condição de geração e radiação combinadas que simula a entrada e saída de ondas numa fronteira do domínio, por exemplo, nas fronteiras abertas;
- ❖ condição de reflexão (total ou parcial) que simula fronteiras como praias, falésias, molhes ou obras acostáveis.

A condição de radiação simula a saída de ondas planas do domínio. A condição de radiação da onda plana é dada por:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} = ik(\cos \mathbf{q})\mathbf{f} \quad (8)$$

em que \mathbf{q} é o ângulo da onda radiada com a normal à fronteira n .

A condição de reflexão parcial, que simula paredes sólidas, como por exemplo, praias, falésias, molhes ou cais, é dada por, Berkhoff (1976):

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} = ik(\cos \mathbf{q})\mathbf{a}_{abs}\mathbf{f} \quad (9)$$

em que \mathbf{a}_{abs} é o coeficiente de absorção dado por $\mathbf{a}_{abs} = \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$ e K_r é o coeficiente de reflexão.

A condição de reflexão total das ondas em fronteiras sólidas é um caso particular deste, uma vez que corresponde a considerar \mathbf{a}_{abs} nulo. Nas fronteiras em que \mathbf{a}_{abs} é unitário, a condição de reflexão transforma-se na condição de radiação plana, o que fisicamente corresponde à absorção completa das ondas que incidem nessas fronteiras.

A condição de geração-radiação aplicada a fronteiras abertas permite a entrada e saída de ondas geradas no domínio e é dada por:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} - ik\mathbf{f} = -ik\mathbf{f}_I + \frac{\partial \mathbf{f}_I}{\partial n} \quad (10)$$

ou

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} = ik(\cos \mathbf{q})\mathbf{f} - ik(\cos \mathbf{q} + \cos \mathbf{b})\mathbf{f}_I \quad (11)$$

em que \mathbf{f}_I é o potencial de velocidade da onda incidente, \mathbf{q} é o ângulo da onda radiada com a normal à fronteira e \mathbf{b} é o ângulo da onda incidente com a normal à fronteira.

2.3 Aplicação do Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é usado para resolver a equação de *mild-slope* com as condições de fronteira dadas. Este método é baseado na aplicação da formulação fraca à equação de *mild-slope*. A formulação fraca é obtida primeiramente através da ponderação, no domínio Ω , do resíduo da equação e das condições de fronteira por uma função peso, $W(x,y)$, e posteriormente pela integração do resíduo no domínio. Obtém-se assim:

$$\int_{\Omega} [\nabla \cdot (CC_g \nabla \mathbf{f}) + (k^2 CC_g) \mathbf{f}] W dx dy - \int_{S_1} \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} \right) CC_g W ds - \int_{S_2} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} - ik(\cos \mathbf{q}) \mathbf{a} \mathbf{f} \right) CC_g \right] W ds -$$

$$-\oint_{S_3} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial n} - ik(\cos \mathbf{q}) \mathbf{f} + ik(\cos \mathbf{q} + \cos \mathbf{b}) \mathbf{f}_I \right) CC_g \right] W ds = 0 \quad (12)$$

em que o integral \oint representa o integral em cada uma das parcelas S_1 , S_2 e S_3 da fronteira S . O domínio Ω é dividido num conjunto de Ne elementos finitos e N pontos nodais. São utilizados elementos triangulares lineares. A aplicação do método de Galerkin à equação anterior conduz, após alguns passos intermédios, ao seguinte sistema de equações:

$$(K_{ki} - P_{ki}) \mathbf{f}_i = F_k \quad (13)$$

com $i, k=1, \dots, N$. K_{ki} são os coeficientes da matriz de rigidez \mathbf{K} (construída e armazenada sob a forma de *skyline*) definida por:

$$K_{ki} = \int_{\Omega_i} \left[CC_g \left(\frac{\mathcal{N}_i}{\mathcal{I}_x} \frac{\mathcal{N}_k}{\mathcal{I}_x} + \frac{\mathcal{N}_k}{\mathcal{I}_y} \frac{\mathcal{N}_i}{\mathcal{I}_y} \right) - (k^2 CC_g) \mathcal{N}_i \mathcal{N}_k \right] dx dy \quad (14)$$

P_{ki} são os coeficientes da matriz \mathbf{P} dados por:

$$P_{ki} = \oint_{S_2} \left(ik(\cos \mathbf{q}) a CC_g \mathcal{N}_i \mathcal{N}_k \right) ds + \oint_{S_3} \left(ik(\cos \mathbf{q}) CC_g \mathcal{N}_i \mathcal{N}_k \right) ds \quad (15)$$

f_i são os coeficientes do vector de forças \mathbf{f} , dados por:

$$f_i = -\oint_{S_3} \left(ik(\cos \mathbf{q} + \cos \mathbf{b}) CC_g \mathbf{f}_I \mathcal{N}_k \right) ds \quad (16)$$

e $\mathcal{N}_i, \mathcal{N}_k(x, y)$ são as funções base dos elementos finitos definidas em cada elemento. Estas funções de base são contínuas em todo o domínio e satisfazem a propriedade interpolatória, isto é, anulam-se quando $i \neq l$ e são unitárias quando $i = l$.

Para a resolução deste sistema de equações, são utilizados dois tipos de métodos: método directo baseado na factorização LDL^T com armazenamento em *skyline* para matrizes simétricas, Fernandes e Fortes (1999); método iterativo (QMR), considerando diferentes formas de pré-condicionamento da matriz \mathbf{K} , Freund e Nachtigal (1994). No caso de aplicação do método iterativo QMR, a matriz \mathbf{K} , que se encontra armazenada na forma *skyline*, é transformada para a forma *compressed sparse row*, CSR.

2.4 Dados e resultados do modelo DREAMS

Na definição e discretização do domínio de cálculo de DREAMS, há que proceder ao posicionamento das fronteiras exteriores e à escolha do espaçamento da malha de elementos finitos.

As fronteiras de entrada ou saída de ondas devem ser colocadas suficientemente afastadas das zonas de perturbação das ondas, de modo a que as condições de fronteira nelas impostas não influenciem os resultados no interior do domínio. Esse afastamento é função do tipo de condição de fronteira considerado e das características da onda. É de salientar que o modelo DREAMS não apresenta qualquer limitação quanto ao ângulo de incidência da onda na fronteira de entrada do domínio de cálculo, pelo que o mesmo domínio computacional pode ser utilizado para uma larga gama de direcções de onda incidente.

Na definição do espaçamento da malha de elementos finitos, há que garantir, quer um número mínimo de pontos por comprimento de onda (8 pontos, pelo menos), quer a correcta reprodução das fronteiras do domínio a discretizar.

Os dados a fornecer ao modelo DREAMS são: as características da agitação incidente (período e direcção da onda); os coeficientes de reflexão em cada troço da fronteira do domínio de cálculo; e as características da malha de elementos finitos, com que foi discretizado o domínio em estudo.

O modelo calcula índices de agitação (H/H_0 , relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0) ou coeficientes de amplificação e direcções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais à superfície livre e as cristas das ondas constituem resultados opcionais.

Os dados e resultados do modelo DREAMS são apresentados sob forma gráfica com a ajuda do programa ACE/GREDIT, Baptista e Turner (1992), podendo efectuar-se a representação:

- ❖ da discretização do domínio de cálculo por elementos finitos (opcional);
- ❖ da batimetria do domínio de cálculo (opcional);
- ❖ da fronteira do domínio de cálculo (opcional);
- ❖ das isolinhas do índice de agitação ou coeficiente de amplificação;
- ❖ as cristas de onda (opcional).

O recurso ao programa ACE/GREDIT torna rápida e eficiente a construção das malhas de elementos finitos, a realização de alterações nas malhas construídas, a preparação dos dados do modelo DREAMS e a visualização dos respectivos resultados.

Os vectores das velocidades horizontais à superfície livre, que se considera coincidente com o nível de repouso, são visualizados com o programa XMVIS, Baptista e Turner (1992).

2.5 Limitações do modelo DREAMS

Como limitações do modelo DREAMS, salientam-se:

- ❖ o modelo não tem em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas portuárias;
- ❖ o modelo é linear pelo que não tem em conta efeitos não-lineares, como por exemplo, a interacção de ondas e correntes, a interacção de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda e a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas;
- ❖ o modelo efectua a propagação de ondas regulares e unidireccionais, não tendo por isso em conta, os efeitos da dispersão em frequência e em direcção, presentes na agitação real;
- ❖ a aplicação do modelo está condicionada a fundos de declive suave, ou seja, até 1:3;
- ❖ na propagação de ondas marítimas de curto período, a aplicação do modelo está limitada a zonas relativamente pequenas.

É de salientar que a exigência de um número mínimo de pontos (8 a 10 pontos) por comprimento de onda em todo o domínio, para garantir a precisão da solução, condiciona significativamente a aplicação do modelo DREAMS a áreas muito extensas. Com efeito, principalmente nos estudos de agitação envolvendo períodos curtos, esta condição conduz a malhas de elementos finitos com um grande número de pontos, o que conseqüentemente exige um grande esforço computacional. Isto coloca sérias restrições à aplicação do modelo a zonas muito extensas.

3. Aplicações do modelo DREAMS

Como referido, o modelo DREAMS pode ser aplicado quer no estudo da penetração da agitação marítima de período curto em portos ou baías, quer no estudo da ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidente. Mais concretamente, o modelo DREAMS foi aplicado nos seguintes tipos de estudos:

- ❖ Estudos de ressonância em portos, Fortes e Covas (1995);
- ❖ Estudos de agitação de curto período no interior de portos, baías ou zonas abrigadas, de modo a determinar as características da agitação (altura e direcção) na bacia portuária para um conjunto de rumos e períodos da agitação incidente, Covas e Fortes (1995) e Fortes e Rita (1996);
- ❖ Estudos de propagação da onda em mar aberto, desde que a área de cálculo seja pouco extensa. Como alternativa, o modelo DREAMS pode ser combinado com o modelo parabólico de refração-difracção REFDIF, Kirby e Dalrymple (1994). O modelo REFDIF efectua a propagação da onda do largo até um determinado local, a partir do qual se utiliza o modelo DREAMS. O estudo de agitação marítima no porto do Cabo Negro, Covas *et al.* (1993), envolveu estes dois modelos numéricos;
- ❖ Estudos de comportamento de navios amarrados ou em manobra nos quais o modelo DREAMS fornece as alturas e direcções das ondas na região de estudo que servem de *input* ao modelo MOORNAV, Neves e Fortes (2000).
- ❖ Ensaios de estabilidade e galgamento nos quais o modelo DREAMS fornece as direcções e alturas de onda que serão reproduzidas pelo bater de ondas nos ensaios físicos bidimensionais ou tridimensionais, Fortes e Neves (2000).

Descrevem-se, de seguida, alguns exemplos de aplicação do modelo DREAMS que ilustram as suas potencialidades.

3.1 Estudo de ressonância no Porto da Baleeira

Neste sub-capítulo, apresenta-se um exemplo da aplicação do modelo DREAMS no estudo do comportamento de uma bacia portuária quando nela incidem ondas de longo período.

O estudo de ressonância no porto da Baleeira teve como objectivo caracterizar o comportamento da solução de obras adicionais de abrigo para o porto da Baleeira, proposta pela Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (DGPNTM), à acção de ondas incidentes de longo período, Fortes e Covas (1995).

O porto da Baleeira é um porto de pesca, situado no extremo poente da costa Algarvia, protegido por um molhe com cerca de 365 m de comprimento, desenvolvendo-se num único alinhamento rectilíneo orientado sensivelmente a N-23°-E - Figura 1. O molhe atinge profundidades próximas dos 15 m em quase todo o seu comprimento.

A solução de obras de abrigo proposta pela DGPNTM é apresentada a tracejado na Figura 1 e consiste basicamente na implantação de um segundo molhe de abrigo.

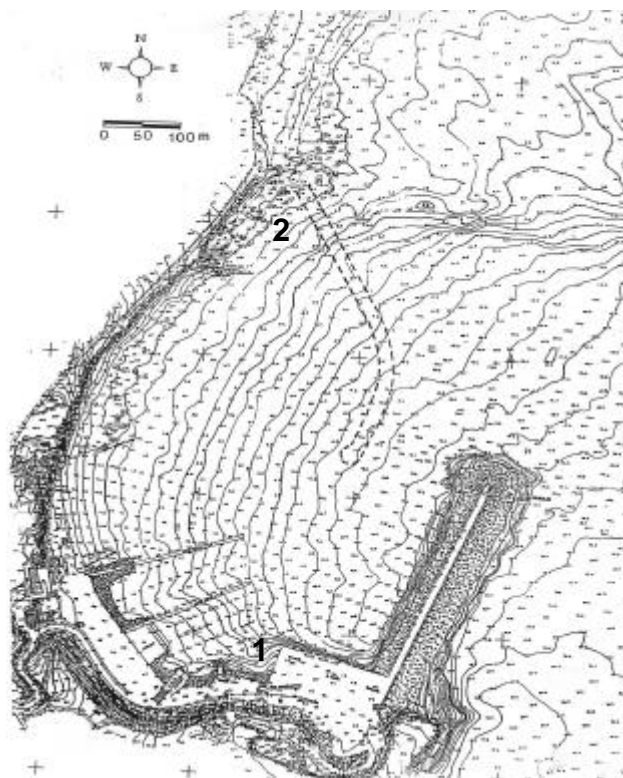


Figura 1 - Porto da Baleeira. Solução de abrigo (a tracejado).

O domínio de cálculo e a batimetria da região considerados para o modelo DREAMS são apresentados na Figura 2. A batimetria da zona que foi objecto de modelação numérica estende-se até profundidades máximas de 25 m.

Na Figura 2 também se representa a malha de elementos finitos com que foi efectuada a discretização do domínio, a qual contém 6765 elementos triangulares e 3609 nós. Nos estudos de ressonância, como os períodos de estudo são elevados, a condição de um número mínimo de pontos por comprimento de onda exigida pelo modelo DREAMS conduz a elementos finitos de grande dimensão. Assim, o número de elementos na malha é relativamente pequeno, mesmo quando o modelo DREAMS é aplicado a áreas extensas.

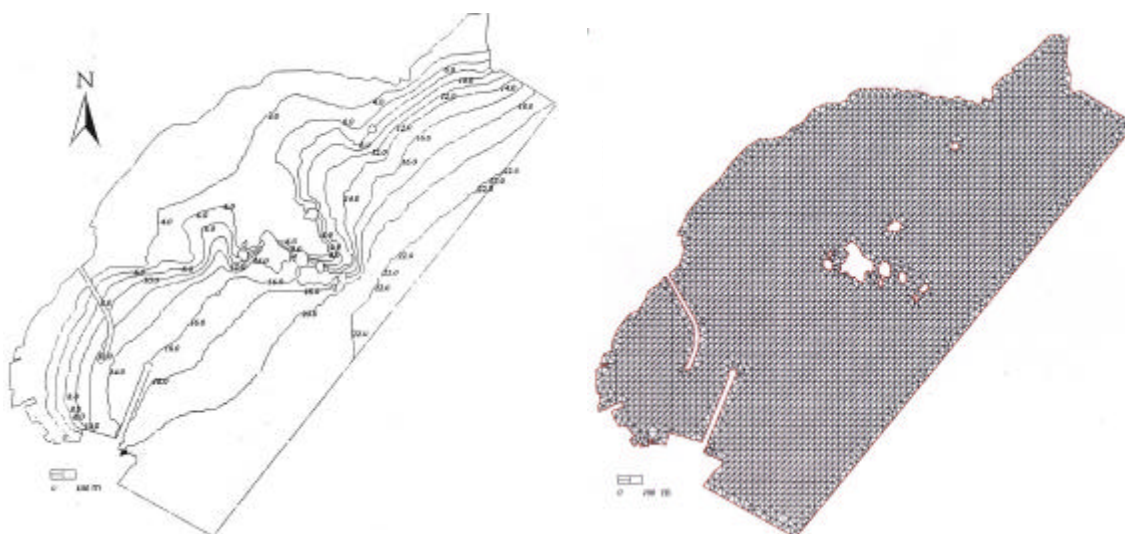


Figura 2 - Porto da Baleeira. Domínio de cálculo, batimetria e malha de elementos finitos utilizados pelo modelo DREAMS.

Os cálculos de ressonância foram efectuados considerando vários rumos locais à entrada da zona em estudo, nomeadamente, SSW (202.5°), S (180°), SSE (157.5°), SE (135°) e ESE (112.5°) e vários períodos de onda variando de 100 a 600 s. O nível de maré foi igual a +2.10 m Z.H..

Os coeficientes de reflexão adoptados em todos os troços constituintes das fronteiras do domínio foram iguais a 1.0, uma vez que, para esta gama de períodos elevados, as fronteiras se comportam como superfícies completamente reflectoras.

Os resultados do modelo DREAMS consistiram nos diagramas do coeficiente de amplificação. Apresenta-se, como exemplo, na Figura 3 e na Figura 4, os diagramas do coeficiente de amplificação para a direcção ESE e períodos de 120 s e 360 s, respectivamente.

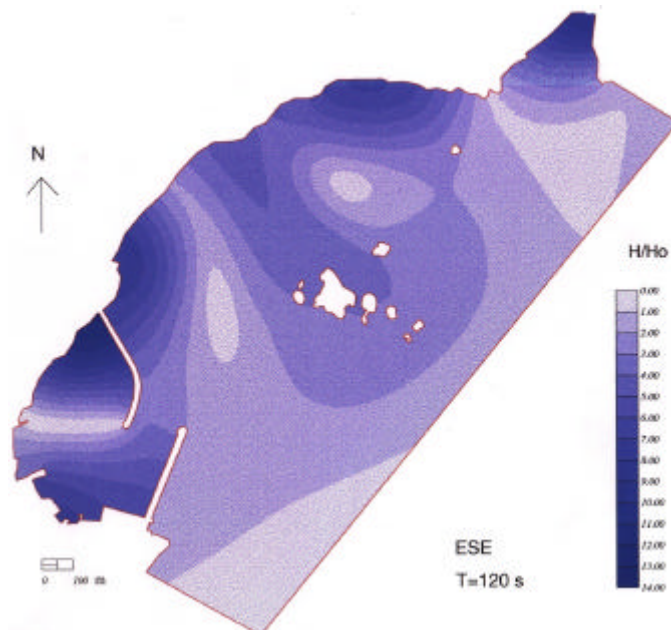


Figura 3 - Porto da Baleeira. Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de ESE (112.5°) e período de 120 s.

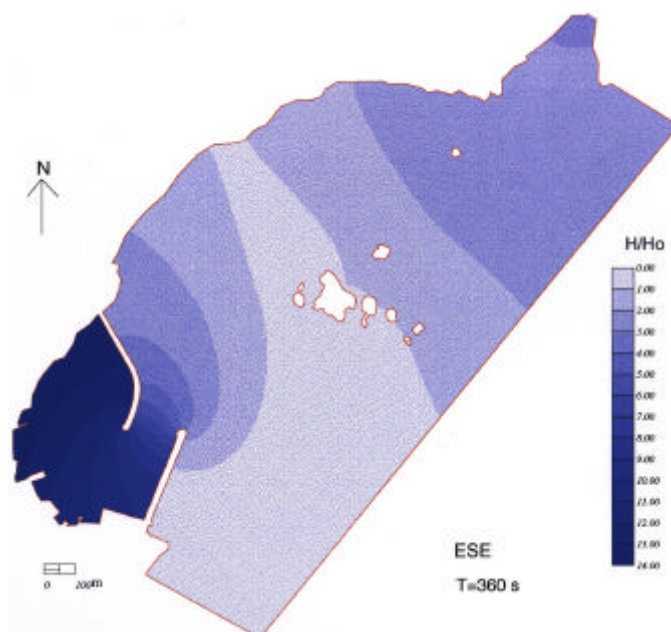


Figura 4 - Porto da Baleeira. Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de ESE (112.5°) e período de 360 s.

Estes dois casos ilustram duas situações diferentes de ressonância no interior do porto da Baleeira. Para o período de onda de 120 s, a bacia oscila em torno de um nodo localizado sensivelmente a meio do porto. Existem dois ventres que ocorrem nas zonas dos pontos 1 e 2, (ver Figura 1). No caso do período de onda de 360 s, a bacia oscila em torno de um nodo localizado na zona de entrada do porto. Existe um único ventre no interior do porto, localizado na zona do ponto 1.

Com base nos resultados de DREAMS, podem construir-se também curvas de resposta (que traduzem a variação do coeficiente de amplificação com o período de oscilação), para as várias direcções de onda incidente. Para este efeito e para o ponto 1, calcularam-se os valores do coeficiente de amplificação para os vários períodos e rumos locais considerados, valores estes que se encontram representados no Quadro 1.

Quadro 1 - Valores do coeficiente de amplificação obtidos no ponto 1.

Rumo	Período (s)										
	100	120	180	240	270	300	360	420	480	540	600
SSW (202.5°)	0.4	8.1	2.0	1.5	0.6	0.9	3.8	3.5	2.5	2.1	1.8
S (180°)	1.1	8.8	2.6	1.4	0.3	1.5	4.1	4.5	3.3	2.7	2.4
SSE (157.5°)	1.8	7.1	3.0	1.1	1.3	3.6	8.4	6.0	4.2	3.4	3.0
SE (135°)	1.2	9.7	2.2	0.9	3.2	6.5	11.8	7.3	5.0	3.9	3.3
ESE (112.5°)	1.8	12.2	0.7	1.7	4.6	8.0	13.8	7.4	5.1	4.0	3.4

Com base no Quadro 1, apresentam-se, na Figura 5, as curvas de resposta da bacia portuária no ponto 1.

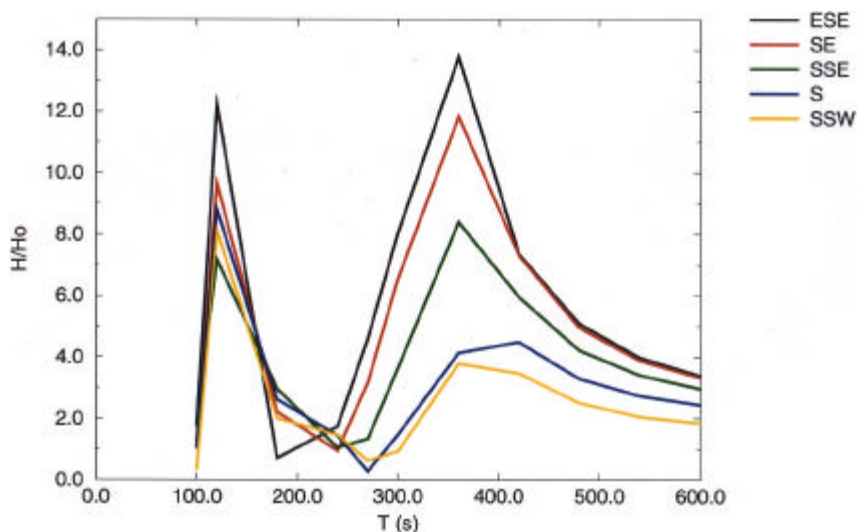


Figura 5 - Porto da Baleeira. Curvas de resposta no ponto 1.

Dos resultados apresentados e com base em Fortes e Covas (1995), verificou-se que a solução estudada conduz a amplificações significativas da agitação de longo período nela incidente para qualquer das direcções de propagação testadas, ou seja:

- ❖ Para direcções de propagação local compreendidas entre SSW (202.5°) e S (180°), verificou-se a situação de ressonância para o período de onda de 120 s, correspondendo-lhe uma oscilação da bacia bi-ventral, ou seja, em torno de um nodo localizado sensivelmente a meio do porto;
- ❖ Para direcções de propagação local compreendidas entre SSE (157.5°) e ESE (112.5°), os períodos de onda que levaram à ocorrência de ressonância no interior do porto foram 120 s e 360 s. A oscilação da bacia correspondente a 360 s é uni-ventral, do tipo

pumping-mode, ou seja, a bacia oscila em torno de um nodo localizado na zona de entrada do porto.

Concluindo, a solução de abrigo correspondente à implantação de um molhe adicional de abrigo não é eficaz na protecção do porto da Baleeira relativamente à acção de ondas de longo período. No entanto, convém salientar que antes da rejeição desta solução de abrigo, é necessário conhecer o clima de agitação nesta zona para verificar da existência e frequência de ocorrência destes períodos tão longos.

3.2 Estudos de agitação no porto da Figueira da Foz

Neste sub-capítulo, apresenta-se um exemplo da aplicação do modelo DREAMS cujos resultados são utilizados num estudo numérico do comportamento de navios amarrados sujeitos à acção de ondas regulares.

Os estudos realizados para o porto da Figueira da Foz foram efectuados com vista à caracterização da agitação de curto período no interior do mesmo e das suas consequências no comportamento dos navios amarrados ao cais comercial, Neves e Fortes (2000) e Santos (2000).

A caracterização da agitação marítima no interior do porto da Figueira da Foz, nomeadamente no ante-porto, no canal principal de acesso às instalações portuárias e no cais comercial, Figura 6, foi efectuada com o modelo matemático DREAMS para diferentes condições de agitação à entrada do mesmo, Neves e Fortes (2000). Os resultados deste estudo determinaram as alturas e direcções de onda a considerar no estudo do comportamento de navios amarrados ao cais comercial. Este estudo foi efectuado com o modelo numérico para o comportamento de navios amarrados, MOORNAV, Santos (1994), de modo a identificar as causas dos movimentos excessivos que por vezes ocorrem nos navios amarrados naquele cais comercial.

O porto da Figueira da Foz situa-se no estuário do Rio Mondego, cuja saída para o mar se faz numa zona de costa arenosa muito extensa. É constituído por dois molhes, designados por molhe norte e molhe sul, construídos, respectivamente, em 1966 e 1967.

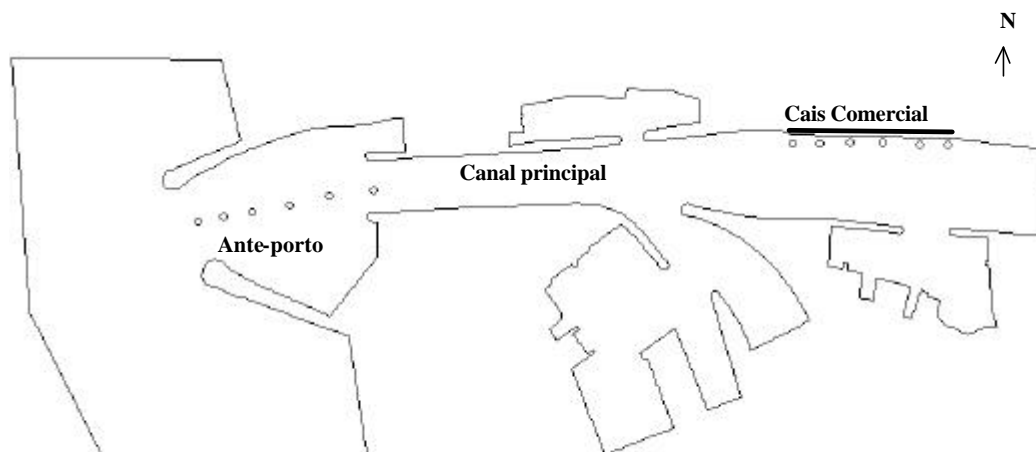


Figura 6 - Esquema do Porto da Figueira da Foz. Domínio de cálculo.

O domínio de cálculo considerado pelo modelo DREAMS é apresentado na Figura 6 e foi discretizado por uma malha de elementos finitos contendo cerca de 36520 nós e 62498 elementos triangulares.

Os coeficientes de reflexão utilizados nos cálculos variaram ao longo da linha de costa uma vez que dependem das características da fronteira e, em cada local, das características da onda, Neves e Fortes (2000). Convém salientar que nos estudos da agitação de período curto

torna-se muito importante definir correctamente os coeficientes de reflexão de cada troço da fronteira, pois estes determinam a agitação no interior das mesmas. A utilização do modelo DREAMS, baseado no método de elementos finitos, aliado ao programa ACE/GREDIT, permite uma correcta discretização das fronteiras do domínio de cálculo e facilita a atribuição dos coeficientes de reflexão a cada troço dessas fronteiras.

Os cálculos com o modelo DREAMS foram efectuados para várias direcções de propagação da onda na entrada do domínio em estudo, compreendidas entre rumos de SW (225°) e W-30°-N(300°) e diversos períodos de onda variando dos 6 aos 15 s. Os resultados obtidos no interior do domínio são expressos em termos do índice de agitação, H/Ho. Na Figura 7 apresenta-se, a título de exemplo, o diagrama dos índices de agitação obtidos com DREAMS para a direcção W (270°) e período de onda de 10 s.

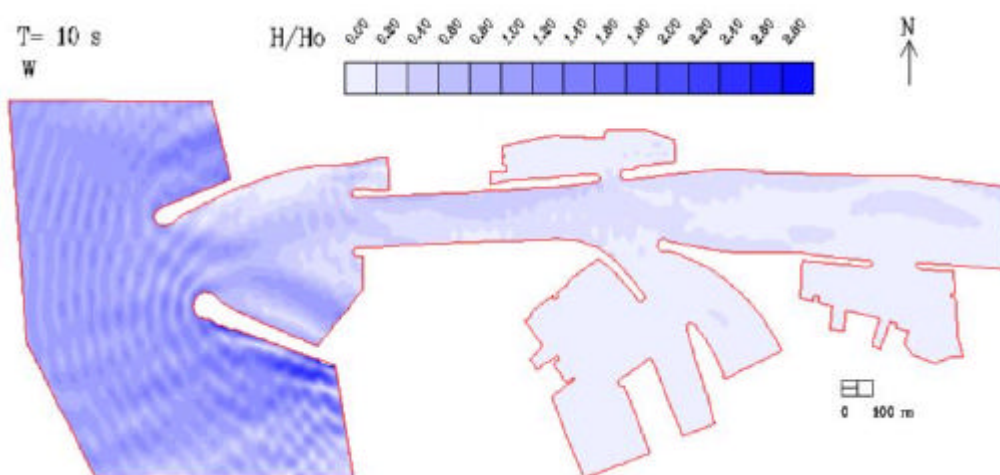


Figura 7 - Porto da Figueira da Foz. Diagrama do índice de agitação para a direcção de propagação local W (270°) e período da onda de T=10 s.

Obtiveram-se também os valores do índice de agitação em pontos localizados no anteporto, no canal principal de acesso e no cais comercial, Figura 6, para as várias condições de cálculo. A título de exemplo, apresentam-se no Quadro 2, os valores máximos do índice de agitação obtidos nos vários pontos junto ao cais comercial.

Quadro 2 - Valores máximos do índice de agitação obtidos nos pontos localizados no cais comercial do porto da Figueira da Foz.

Local	Rumo Local	Período (s)				
		6	8	10	12	15
Cais Comercial	SW (225°)	0.12	0.14	0.22	0.35	0.24
	W-30°-S (240°)	0.12	0.30	0.34	0.35	0.24
	W-20°-S (250°)	0.29	0.34	0.38	0.32	0.25
	W-15°-S (255°)	0.41	0.38	0.37	0.32	0.26
	W (270°)	0.38	0.30	0.29	0.25	0.19
	W-15°-N (285°)	0.11	0.13	0.20	0.20	0.13
	W-20°-N (290°)	0.10	0.10	0.16	0.19	0.10
	W-30°-N (300°)	0.07	0.10	0.15	0.17	0.10

Dos resultados apresentados e com base em Neves e Fortes (2000), verificou-se que o porto se encontra pouco protegido para a agitação proveniente das direcções de propagação locais de SW (225°) a W (270°), casos em que a ondulação entra francamente no canal

principal. Os valores máximos do índice de agitação que se obtiveram para estes rumos variam, para os períodos analisados, entre 0.12 e 0.41 no cais comercial. Para direcções de propagação local compreendidas entre W-15°-N (285°) e W-30°-N (300°) a agitação no interior do porto é menor não ocorrendo valores do índice de agitação superiores a 0.2 no cais comercial. Assim, a ocorrência de agitação indesejável no interior do porto está relacionada com a penetração de ondas curtas do 3º quadrante, cujos rumos na entrada do porto variam entre W a SW.

É de salientar que na análise dos resultados do estudo de agitação do porto da Figueira da Foz se deve ter em conta as limitações do modelo DREAMS, principalmente as associadas ao facto do modelo não simular o galgamento das estruturas portuárias ou a interacção das ondas e correntes, cujo efeito na entrada do porto pode ser significativo.

Os resultados deste estudo de agitação serviram para determinar as alturas de onda na zona do cais comercial, que foram utilizadas na aplicação do pacote numérico MOORNAV no estudo do comportamento de um navio amarrado ao cais comercial e sujeito à acção de ondas regulares.

3.3 Análise comparativa de soluções de abrigo de zonas portuárias sujeitas à acção de ondas de curto período

Neste sub-capítulo, apresentam-se exemplos da aplicação do modelo DREAMS cujo objectivo é efectuar uma análise comparativa do comportamento de diferentes configurações de uma bacia portuária à acção de ondas de curto período.

Como exemplos deste tipo de estudos, refere-se as aplicações do modelo DREAMS:

- ❖ no estudo de agitação da solução de abrigo, proposta pela DGPNTM, para o porto da Baleeira, Covas e Fortes (1995);
- ❖ na caracterização da agitação marítima no interior do porto de Vila do Conde, Zózimo *et al.* (2001).

3.3.1 Porto da Baleeira

Neste estudo, cuja área de estudo e domínio de cálculo se encontram descritos na Figura 2, pretendia-se saber se a inclusão de uma obra de protecção adicional (a tracejado na Figura 1), melhorava significativamente as condições de abrigo da bacia portuária, assim definida, face à acção de ondas de curto período.

Primeiramente, foram definidas duas configurações portuárias: uma correspondente à situação actual (sem a obra adicional) e a outra incluindo a obra adicional.

Estes domínios de cálculo foram discretizados por duas malhas de elementos finitos com as seguintes características:

- ❖ Situação actual (sem obra adicional) - 21280 nós e 41749 elementos triangulares;
- ❖ Solução de abrigo (com obra adicional) - 21250 nós e 41629 elementos triangulares.

A malha de elementos finitos correspondente à configuração com a obra adicional foi construída a partir da malha de elementos finitos correspondente à configuração actual, com ajuda do programa ACE/GREDIT. Esta facilidade de alterar os domínios de cálculo constitui uma grande vantagem dos modelos DREAMS e ACE/GREDIT.

Posteriormente, efectuaram-se cálculos com o modelo DREAMS para as duas configurações portuárias, considerando as mesmas condições de cálculo à entrada do domínio, isto é, rumos locais variando entre ESE (112.5°) e SSW (202.5°) e períodos de onda de 8 a 20 s. A comparação entre diagramas dos índices de agitação obtidos para as duas configurações permitiu aferir do abrigo obtido no interior do porto da Baleeira com a nova solução.

Na Figura 8, apresentam-se os resultados do modelo DREAMS para as duas configurações referidas, considerando uma onda incidente de período igual a 12 s e direcção de ESE.

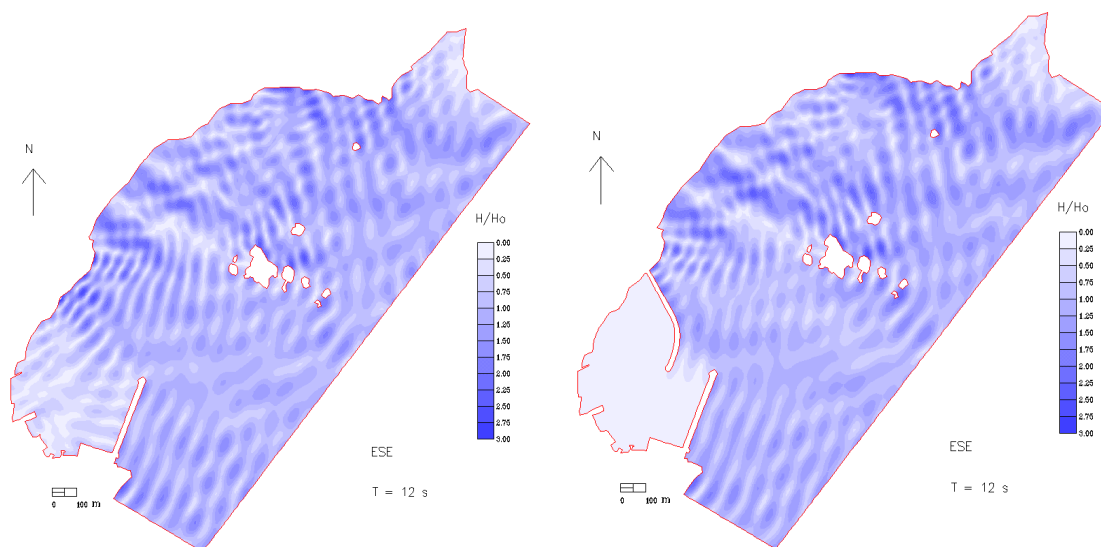


Figura 8 - Porto da Baleeira. Valores do índice de agitação para a geometria actual e para a solução de abrigo, considerando o rumo local de ESE (112.5°) e um período de 12 s.

Na Figura 8 verifica-se claramente que os índices de agitação no interior da bacia portuária são significativamente inferiores na configuração portuária que inclui a obra adicional de abrigo relativamente aos índices de agitação correspondentes à configuração sem essa obra. Dos trabalhos de Covas e Fortes (1995), verificou-se que a solução de abrigo melhorava significativamente as condições de abrigo do porto da Baleeira à acção de ondas de curto período.

3.3.2 Porto de Vila do Conde

No interior do porto de Vila do Conde, está projectada a construção de uma doca de recreio constituída por dois quebra-mares, sendo um deles flutuante, Figura 9.

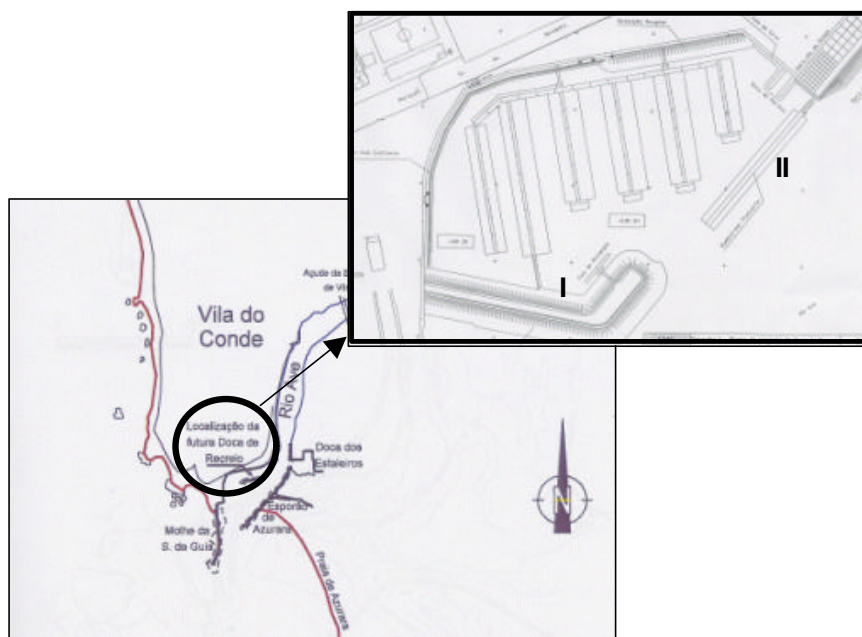


Figura 9 - Porto de Vila do Conde. Adaptado de Fortunato *et al.* (2001).

Nesta figura, o quebra-mar fixo é assinalado como quebra-mar I, enquanto que o quebra-mar flutuante é assinalado como quebra-mar II.

O objectivo do estudo da caracterização da agitação de curto período no porto de Vila do Conde realizado no LNEC, Zózimo *et al.* (2001), foi determinar as alturas de onda em frente ao quebra-mar I da doca de recreio do porto. Estes valores foram utilizados nos ensaios, em modelo físico, de estabilidade e galgamento do referido quebra-mar.

Em complemento a este estudo, foi avaliada a influência da presença do quebra-mar flutuante na agitação que se verifica no interior da doca de recreio. Para este efeito, como a simulação do comportamento de um quebra-mar flutuante não é contemplada pelo modelo DREAMS, e dado que existe a possibilidade de não se empregar o quebra-mar flutuante, mas sim uma estrutura fixa, optou-se por considerar duas configurações portuárias, Figura 10:

- ❖ Hipótese I – geometria portuária que não inclui o quebra-mar II, isto é, o quebra-mar flutuante;
- ❖ Hipótese II – geometria portuária que inclui um quebra-mar vertical (em lugar de um quebra-mar flutuante).

Para estas duas configurações geométricas, foram efectuados cálculos com DREAMS para as mesmas condições de onda incidente. Desta forma, são caracterizadas duas situações extremas de agitação no interior da doca de recreio, entre as quais se situará a agitação realmente verificada na presença de um quebra-mar flutuante.

Para os domínios de cálculo correspondentes às hipóteses I e II, construíram-se malhas de elementos finitos, as quais contém 31435 nós e 61603 elementos e 31350 nós e 61525 elementos triangulares, respectivamente.

Os cálculos de agitação foram efectuados para os dois domínios de cálculo considerando rumos locais de S-35°-W (215°), SSW (202.5°), W-30°-S (240°), W-15°-S (255°) e W (270°) e períodos de onda de 8, 12, 14, 16 e 20 s.

Apresentam-se, na Figura 10, os diagramas de índices de agitação obtidos para o período de 8 s e direcção de onda de SW correspondentes às hipóteses I e II.

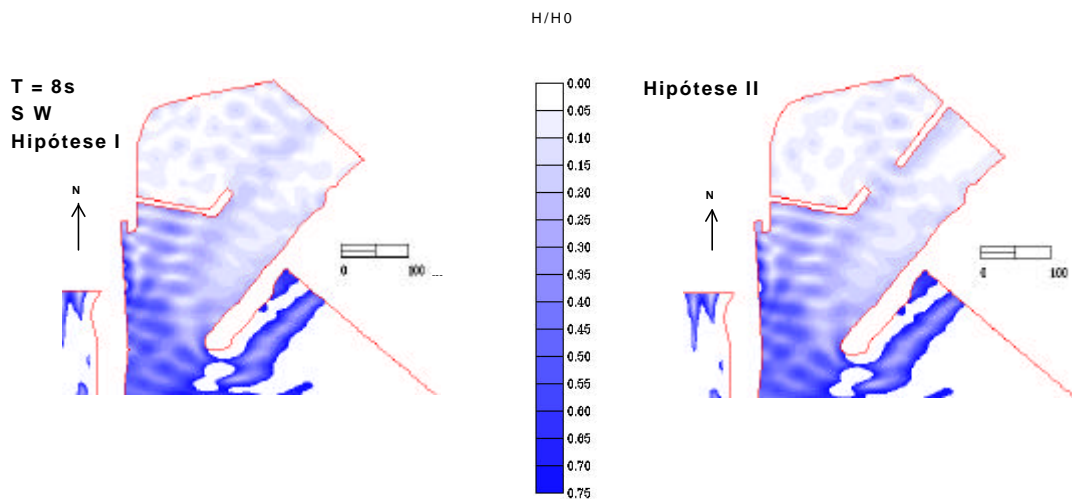


Figura 10 - Porto de Vila do Conde. Diagramas dos índices de agitação para a direcção de propagação local SW e período da onda de $T = 8$ s, para as hipóteses I e II.

Apresentam-se, no Quadro 3, os valores máximos do índice de agitação calculados em pontos do interior da doca de recreio do porto de Vila do Conde, para as condições de cálculo.

Quadro 3 - Valores máximos do índice de agitação obtidos nos pontos localizados na doca de recreio do porto de Vila do Conde.

Geometria	Rumo (°)	Período (s)				
		8	12	14	16	20
Hipótese I	S - 35° - W (215°)	0.10	0.19	0.10	0.10	0.17
	SW (225°)	0.10	0.18	0.08	0.08	0.13
	W - 30° - S (240°)	0.08	0.16	0.07	0.08	0.11
	W - 15° - S (255°)	0.04	0.12	0.06	0.06	0.09
	W (270°)	0.04	0.08	0.04	0.05	0.07
Hipótese II	S - 35° - W (215°)	0.06	0.09	0.07	0.10	0.16
	SW (225°)	0.06	0.08	0.05	0.08	0.12
	W - 30° - S (240°)	0.05	0.07	0.05	0.09	0.10
	W - 15° - S (255°)	0.02	0.05	0.04	0.06	0.08
	W (270°)	0.02	0.04	0.03	0.05	0.07

Da Figura 10, verifica-se que a presença do quebra-mar II leva a uma ligeira redução da agitação no interior da doca de recreio. Do Quadro 3 e dos restantes cálculos efectuados, Fortes e Neves (2000), constatou-se que a influência do quebra-mar II se faz sentir principalmente para os períodos mais pequenos, onde se nota uma redução dos índices de agitação no interior da doca. Para os períodos maiores, essa influência não é tão significativa.

Como referido, os resultados do modelo DREAMS no interior do porto de Vila do Conde, Fortes e Neves (2000), serviram essencialmente para a determinação das alturas de onda em frente ao outro quebra-mar (quebra-mar I) da doca de recreio. Com base nesses resultados, foram calculados, em pontos junto ao quebra-mar I, os valores dos índices de agitação para as condições de cálculo testadas, valores estes que, conjuntamente com o regime de extremos definido à entrada do porto, Capitão *et al.* (2000), permitiram determinar as máximas alturas de onda verificadas em frente ao quebra-mar I. Estes valores foram utilizados nos ensaios, em modelo físico, de estabilidade e galgamento do quebra-mar I.

4. Conclusões

Nesta comunicação, apresentou-se primeiramente uma descrição geral dos modelos matemáticos que foram desenvolvidos no LNEC (ou em colaboração com o IST) de propagação e deformação da agitação marítima em zonas portuárias ou costeiras, e que são normalmente utilizados, em estudos de refração, REFRAC, em estudos de agitação em portos de geometria simples, DIFRA1 e DIFRA2, ou em estudos de agitação e ressonância em zonas portuárias ou abrigadas de geometria arbitrária, DIFRES e DREAMS. Estes modelos já foram utilizados com sucesso em variadíssimos estudos de caracterização da agitação marítima em portos, baías e praias, ou seja, na generalidade das zonas costeiras.

Dos modelos referidos, descreveu-se com maior pormenor o modelo DREAMS, que simula a propagação e deformação de ondas monocromáticas em fundos de declive suave tendo em conta os efeitos combinados da refração, difracção e da reflexão de ondas monocromáticas. Apresentaram-se várias aplicações do modelo DREAMS, que ilustram as suas potencialidades nos estudos de: penetração da agitação de curto e longo período em zonas portuárias; comparação de soluções de abrigo de bacias portuárias; e de estimação de valores de índices de agitação a serem utilizados, quer por outros modelos numéricos, quer em modelos físicos.

Estas aplicações demonstram que o modelo DREAMS (conjuntamente com o programa ACE/GREDIT) é um modelo bastante eficaz, económico e versátil na caracterização da agitação marítima em zonas abrigadas e, conseqüentemente, uma ferramenta auxiliar importante no projecto de obras portuárias ou costeiras.

Os futuros desenvolvimentos do modelo DREAMS são no sentido de incluir a rebentação das ondas, os efeitos das correntes na propagação das ondas e a simulação da agitação irregular. Estas extensões permitirão alargar o domínio de aplicabilidade do modelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Marítimo-Portuário a autorização para publicação dos resultados destes estudos. Expressam os seus agradecimentos, aos Engs. João Santos e Ana Catarina Zózimo e aos técnicos experimentadores Franklin Carvalho e Branca Branco pelo apoio na revisão do texto e na produção das figuras.

Agradecem igualmente o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através dos projectos intitulados “ Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas costeiras”, N° PRAXIS/C/ECM/12100/98, e “Valorização e Protecção da Zona Costeira Portuguesa” – componente 7 intitulada “Modelação de propagação de ondas marítimas em zonas costeiras”.

Referências bibliográficas

- Baptista, A.M.; Turner, P. (1992) - *ACE/GREDIT*. User's manual. Software for semi-automatic generation of two dimensional finite element grids. Center for Coastal and Land-Margin Research. Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
- Berkhoff, J.C.W. (1972) - *Computation of combined refraction-diffraction*. Proc. 13^d International Conference in Coastal Engineering, Vancouver (Canada), 1972, Vol. 2, pp. 471-490.
- Berkhoff, J.C.W. (1976) - Mathematical models for simple harmonic linear waves, wave diffraction and refraction, Delft Hydraulics Laboratory, N° 163.
- Booij, N. (1983) - A note on accuracy of the mild-slope equation. *Coastal Engineering*, Vol. 7, pp. 191-203.
- Capitão, R.P.; Fortes, C.J.E.M.; Carvalho, M.M. (2000) - Vila do Conde. Doca de recreio. Estudos de agitação marítima na zona marítima adjacente ao porto. 1ª fase: Regime de extremos. Relatório 264/00-NPP, LNEC, Outubro.
- Covas, J.M.A. (1971) - *Cálculo e traçado de planos de ondulação por computador*. Proc. Simpósio sobre dados de agitação marítima. Lisboa.
- Covas, J.M.A. (1977) - Cálculo e desenho de diagramas de refração em computador. Boletim mensal de informação do LNEC n° 330 de Agosto/Setembro.
- Covas, J.M.A. (1980a) - Molhe Oeste do porto de Sines. Estudo, com um modelo matemático da refração das ondas de gravidade, da possibilidade de ocorrência de concentrações de energia na zona do molhe. Relatório NPP, LNEC, Lisboa, Abril.
- Covas, J.M.A. (1980b) - Porto de Sesimbra - contribuição para o estudo da agitação marítima; diagramas de refração. Relatório NPP, LNEC, Lisboa, Julho.
- Covas, J.M.A. (1980c) - Anteprojecto da 1ª fase do porto de Sesimbra. Estudo, em modelo matemático, da agitação no interior do porto. Soluções 1, 2A e 3C. Relatório NPP, LNEC, Lisboa, Setembro.
- Covas, J.M.A. (1981a) - Modelos matemáticos para o estudo da propagação e da deformação das ondas de gravidade. O cálculo automático de diagramas de refração. Memória n° 551, LNEC, Lisboa.
- Covas, J.M.A. (1981b) - Modelos matemáticos para o estudo da propagação e deformação das ondas de gravidade. Cálculo automático da agitação no interior de um porto. Memória N.° 558, LNEC, Lisboa.
- Covas, J.M.A. (1982a) - Porto da Praia da Vitória. Estudo, em modelo matemático, da difracção da onda. Relatório NPP, LNEC, Lisboa, Abril de 1982.
- Covas, J.M.A. (1982b) - Estudo, em modelo matemático, da agitação na bacia de manobra do porto da Horta. Relatório NPP, LNEC, Lisboa, Agosto.
- Covas, J.M.A. (1983) - *Os modelos matemáticos de difracção-reflexão do LNEC*. Proc. I Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e modelação matemática em Hidráulica e Recursos Hídricos, Blumenau, Brasil.
- Covas, J.M.A. (1985a) - Port de plaisance aux Sables d'Or (Royaume du Maroc). Etudes d'agitation sur modèle mathématique. Relatório 214/85-NPP, LNEC, Lisboa, Julho.
- Covas, J.M.A. (1985b) - Utilização de modelos matemáticos de difracção em estudos de penetração da agitação em portos – A experiência do LNEC e perspectivas futuras. Projecto de investigação apresentado nas provas de doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Hidráulica, no Instituto Superior Técnico. LNEC, Lisboa.
- Covas, J.M.A. (1988) - Contribuição para o estudo da agitação marítima na baía de Cascais. Diagramas de refração. Relatório 116/88-NPP, LNEC, Lisboa, Junho.
- Covas, J.M.A. (1989a) - Saint Quay-Portrieux. Etude d'agitation et de résonance du port sur modèle mathématique. Relatório 128/89-NPP, LNEC, Lisboa, Julho.

- Covas, J.M.A. (1989b) - Aeroporto Internacional de Macau. Estudos preliminares de agitação marítima. Relatório 219/89-NPP, LNEC, Lisboa, Novembro.
- Covas, J.M.A. (1992a) - Modelo matemático de cálculo da agitação e ressonância em portos e zonas abrigadas (Método dos elementos de fronteira). Relatório 286/92-NPP, LNEC, Março.
- Covas, J.M.A. (1992b) - Porto da Baleeira. Estudo de ressonância com modelo matemático. Relatório 188/92-NPP, LNEC, Lisboa, Março.
- Covas, J.M.A.; Fortes, C.J.E.M. (1995) - Porto da Baleeira. Estudo das condições de abrigo em modelo matemático. Relatório 204/95-NPP, LNEC, Julho.
- Covas, J.M.A.; Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G.O.; Sancho, F. (1993) - Port de plaisance du Cabo Negro. Etudes d'agitation sur modèle mathématique. Relatório 98/93-NPP, LNEC.
- Fernandes, J.L.M. (1990) - Programa DREAMS (Versão original).
- Fernandes, J.L.M.; Fortes, C.J.E.M. (1999) - Solução vectorizável e paralelizável de sistemas de equações de grande dimensão em mecânica computacional. Um método directo usando o armazenamento CSR para as equações matriciais simétricas do Método dos Elementos Finitos. Relatório 180/99 - NPP, LNEC, Lisboa, Julho.
- Fortes, C.J.E.M. (1993) - Modelação matemática da refração e difracção combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos. Dissertação de mestrado em Eng. Mecânica, IST, Junho.
- Fortes, C.J.E.M.; Covas, J.M.A. (1995) - Porto da Baleeira. Estudo das condições de ressonância em modelo matemático. Relatório 309/95-NPP, LNEC, Novembro.
- Fortes, C.J.E.M.; Covas, J.M.A.; Fernandes, J.L.M. (1996) - Modelos matemáticos DIFRES e DREAMS. Aplicação nos estudos de ressonância e agitação do porto da Baleeira. *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, Vol. 17, N.º 1, Março, pp. 83-94.
- Fortes, C.J.E.M.; Covas, J.M.A.; Fernandes, J.L.M. (1997) - *Harbour resonance and wave agitation studies in Baleeira's harbour by using the mathematical model DREAMS*. Proc. 3rd Int. Conference WAVES 97 – Ocean wave Measurement and Analysis, ASCE, Vol. 2, pp. 1495-1509. Virginia, USA.
- Fortes, C.J.E.M.; Fernandes, J.L.M.; Covas, J.M.A. (1993) - *Harbour resonance and wave refraction-diffraction computations in harbours using the finite element method*. Proc. Finite Elements in Fluids. New trends and applications, Vol. 2, pp. 1067-1080.
- Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G.O. (2000) - Doca de recreio do porto de Vila do Conde. Estudos de agitação marítima e ensaios de galgamento – 2.ª fase: Caracterização da agitação marítima no interior do porto. Relatório 308/00 – NPP, LNEC, Lisboa.
- Fortes, C.J.E.M.; Rita, M.M. (1996) - Porto exterior, Macau. Estudo das condições de operacionalidade e segurança obtidas com o alteamento dos quebra-mares existentes. Relatório 180/96-NPP, LNEC, Julho.
- Fortunato, A.B.; Vicente, C.; Freire, P.; Oliveira, A. (2001) - *Doca de recreio do porto de Vila do Conde: estudos de hidrodinâmica e de dinâmica sedimentar*. Proc. 2.^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, 17 a 19 de Outubro.
- Freund, R.W.; Nachtigal, N.M. (1994) - An implementation of the QMR method based on coupled two-term recurrences. *SIAM J. Sci. Comput.*, Vol. 15, N.º 2, pp. 313-337, Março.
- Kirby, J.T.; Dalrymple, R.A. (1994) - Combined refraction/diffraction model REF/DIF1. Version 2.5 Res. Rep. CACR-94-22. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Neves, M.G.O.; Fortes, C.J.E.M. (2000) - Porto da Figueira da Foz. Estudo do melhoramento das condições actuais de navegabilidade. Estudos de agitação marítima. Caracterização da agitação marítima no interior do porto da Figueira da Foz. Relatório 98/00-NPP, LNEC, Maio.
- Oliveira, F. S. B. F. (1997) - Numerical modelling of irregular wave propagation in the nearshore region. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine, London, U.K.
- Santos, J.A. (1994) - MOORNAV - Numerical model for the behaviour of moored ships. Relatório 3/94-B. Projecto NATO PO-WAVES, Lisboa, IH-LNEC, Novembro.
- Santos, J.A. (2000) - Porto da Figueira da Foz. Estudo do melhoramento das condições actuais de navegabilidade: Comportamento de navios amarrados ao cais comercial. Relatório 228/00, LNEC, Setembro.
- Smith, R.; Sprinks, T. (1975) - Scattering of surface waves by a conic island. *J. Fluid Mechanics*, Vol. 72, Part 2, pp. 373-384.
- Zózimo, A.C.; Capitão, R.; Neves, M.G.O.; Fortes, C.J.E.M.; Carvalho, M.M. (2001) - *Doca de recreio do porto de Vila do Conde. Estudos de agitação marítima*. Proc. 2.^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, 17 a 19 de Outubro.