



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

## **CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRANQUILIDADE NA ZONA DE ENTRADA DO PORTO DE LEIXÕES FACE A ONDAS DE PERÍODO CURTO (10 A 18S)**

Ana Mendonça, António Trigo Teixeira, Ildeberto Mota Oliveira, António Pires Silva

Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura  
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa  
anam@civil.ist.utl.pt, trigo.teixeira@civil.ist.utl.pt, mo@civil.ist.utl.pt, aps@civil.ist.utl.pt

### **RESUMO**

Estudam-se as condições de tranquilidade à entrada do porto de Leixões para ondas de períodos de 10 a 18s provenientes do sector entre o W-20°-S e o Noroeste. São utilizados dois modelos de propagação de agitação: do largo até junto da entrada do porto é utilizado o modelo STWAVE, e na propagação local o modelo REFDIF. A amplitude complexa na fronteira de sotamar do modelo STWAVE é calculada com base num algoritmo de interpolação a partir dos valores  $H_{m0}$ ,  $T_p$  e  $\theta_m$ . Esta condição serve para transposição entre modelos e é dada na fronteira oceânica do modelo REFDIF.

O estudo, promovido pela Administração dos Portos do Douro e Leixões – APDL, foi motivado pelo elevado grau de inoperacionalidade do terminal de recepção de navios tanque (Posto A) que se encontra à entrada do porto de Leixões. Na opinião dos pilotos da barra os problemas acontecem para: “ondas de Oeste, e menos as de Noroeste, quando associadas a períodos superiores a 11 ou 12s; as de Noroeste “correm” ao longo do molhe e, por isso, não causam tantos problemas; o Sudoeste não é tão preocupante; a onda é em geral curta e o navio fica insensível; quaisquer que sejam as condições de agitação, o navio mantém-se “sossegado” em baixa-mar. Os problemas começam a sentir-se uma ou duas horas depois da baixa-mar, e aumentam de gravidade até à preia-mar”.

As simulações efectuadas permitem concluir que os problemas de inoperacionalidade do Posto A não resultam da agitação residual que, por difracção, penetra na zona abrigada pelo molhe exterior. De facto, embora os resultados não sejam válidos em zonas de difracção que estejam para além duma linha a cerca de 70° com a direcção de propagação da onda, em todos os cenários ensaiados a onda atinge a zona de estacionamento do navio com uma altura suficientemente pequena para não poder provocar a sua instabilização. Com uma onda com elevado período (18s) e energia ( $H_{m0}=10$  m), proveniente do rumo considerado o mais perigoso, o Oeste, a proa do navio acostado no Posto A só é atingida por ondas de altura inferior a 1 m.

Ondas mais rodadas a Sul agravam as condições de agitação à entrada do porto. No entanto, levando em conta, por exemplo, os resultados relativos também a uma onda com elevado período (18s) e energia ( $H_{m0}=10$  m), com uma probabilidade de ocorrência muito baixa dado o rumo associado (W-20°-S), conclui-se que mesmo neste caso a altura máxima da onda no posto de acostagem será apenas um pouco superior a 1 m.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

### 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte dos Estudos de Base, promovidos pela Administração dos Portos do Douro e Leixões – APDL, que têm vindo a ser realizados tendo em vista melhorar as condições de operacionalidade do Posto A do terminal de petroleiros do Porto de Leixões. Trata-se de um terminal de recepção de navios tanque que se encontra abrigado pelo quebramar principal na zona de entrada do porto (Posto A). Um elevado grau de inoperacionalidade vem afectando seriamente a utilização deste terminal, que abastece de ramas a refinaria de Leça da Palmeira localizada na vizinhança imediata do porto.

O Porto de Leixões recebe actualmente mais de 3000 navios por ano num conjunto de terminais entre os quais se contam: dois Terminais de Contentores, um Terminal Petrolero, um Terminal Cerealeiro, cais para movimentação de Granéis Líquidos, Granéis Sólidos, Carga Geral Fraccionada, carga Roll.On/Roll.Off e um Terminal para navios de Cruzeiro Turístico.

Um bom porto precisa de águas tranquilas que facilitam a manobra e operação dos navios. Por esse motivo, é essencial desenhar convenientemente a bacia portuária e as suas obras de abrigo, por forma a minimizar a acção das ondas de longo período e a evitar a entrada da agitação oceânica.

O Posto A, pela posição que ocupa, poderá ser atingido pela agitação oceânica que se difracta em torno da cabeça do molhe, agitação proveniente de rumos ao largo que se estima se possam situar entre o SW e o NW. Assim, estudam-se as condições de tranquilidade na zona de entrada do porto face a ondas de curto período ( $10s < T < 18s$ ) provenientes daquele sector. O tratamento das ondas de longo período é feito com recurso a outro tipo de modelos e por isso é objecto de um estudo autónomo.

A aplicação de modelos matemáticos no estudo de problemas associados às estruturas portuárias e costeiras tem sofrido uma evolução notável nos últimos anos, relacionada quer com as capacidades de cálculo dos meios informáticos e tempo computacional necessário, quer com os custos a eles associados, considerados uma vantagem relativamente aos elevados custos inerentes às observações “in situ” ou aos estudos em modelos físicos.

O objectivo da aplicação de modelos de propagação de ondas é descrever quantitativamente a variação dos parâmetros de onda (altura, período, direcção e forma espectral) entre o largo e a costa. Para águas profundas, a propagação da agitação é relativamente homogénea à escala dos quilómetros, mas para pequenas profundidades, onde a propagação é afectada pela batimetria, pelo nível do mar e pelas correntes, as características da agitação podem variar em poucas dezenas de metros. Informação sobre as características da agitação junto aos portos e costas é necessária para a maioria das realizações da engenharia costeira e portuária, uma vez que influenciam directamente o transporte de sedimentos, as correntes costeiras, a agitação residual e o impacto hidrodinâmico sobre estruturas.

O presente trabalho envolveu a utilização de dois modelos matemáticos, STWAVE e REF/DIF1. O primeiro para a caracterização da propagação das ondas do largo até próximo da costa, o segundo para a caracterização do comportamento das ondas na zona próxima do quebramar do porto de Leixões.

### 2. BATIMETRIA

Todos os modelos de propagação de ondas precisam da descrição do relevo submarino. Como a propagação se faz do largo (grandes profundidades) para a costa estão envolvidas grandes áreas que podem apresentar singularidades no seu interior. Por outro lado, é quase impossível obter de uma única fonte a batimetria que cubra a zona em estudo, o que implica um trabalho de montagem, compatibilização, validação e georreferenciação dos elementos compilados.

A simulação da propagação das ondas recorrendo aos modelos STWAVE e REF/DIF1 envolveu a recolha e preparação dos dados de batimetria a utilizar. Inicialmente dispunha-se apenas da batimetria em formato “shapefile” fornecida pela APDL relativa à zona envolvente do porto até à



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

batimétrica dos 25 m, que corresponde à zona coberta pela carta hidrográfica do Porto de Leixões e Barra do Douro, Carta nº 26402 do Instituto Hidrográfico (IH). Uma vez que os pontos constantes daquela base não definiam convenientemente a zona a estudar, foram complementarmente utilizadas duas cartas hidrográficas e um ortofotomapa, que se passam a descrever.

O ortofotomapa, obtido no Instituto Geográfico de Portugal, facultou a observação das zonas de terra e a geração de novos pontos que possibilitaram uma melhor definição e visualização dessas zonas, e sobretudo uma definição mais detalhada do quebramar, Figura 1.

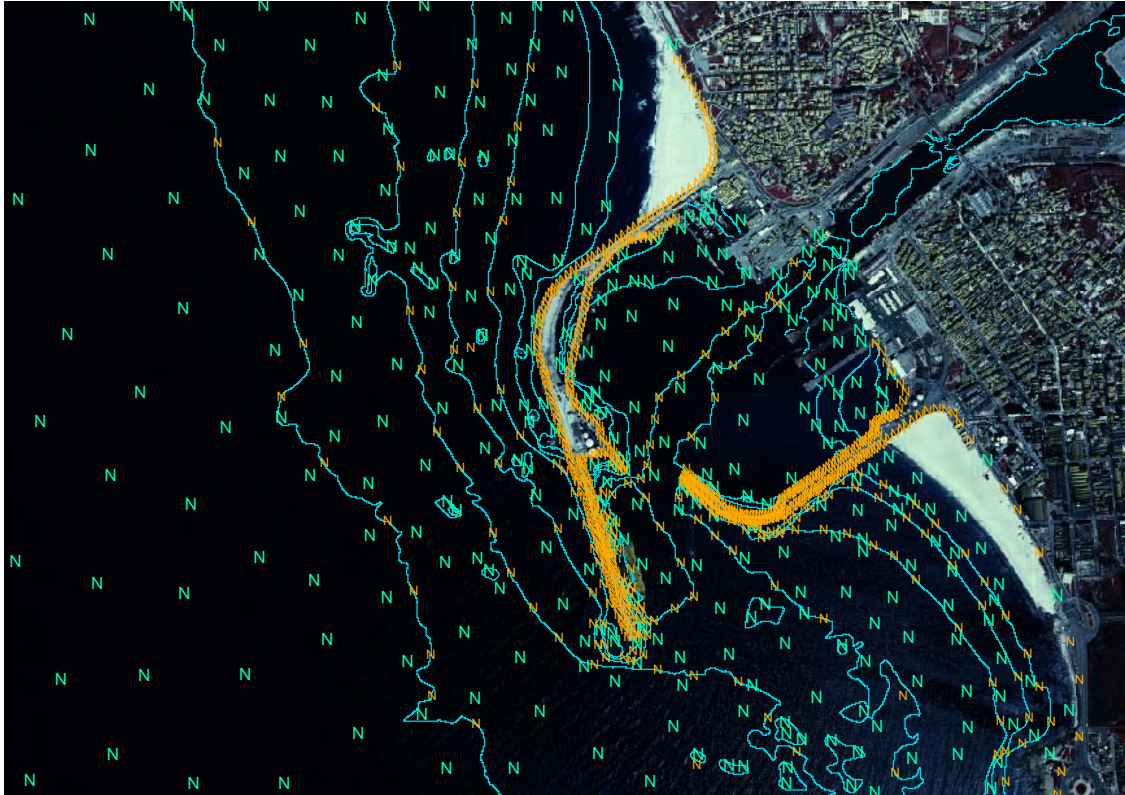


Figura 1 – Ortofotomapa do Porto de Leixões e “shapefile” com representação de batimetria.

Foram criadas duas fiadas de pontos ao longo dos molhes Norte e Sul, bem como pontos definidores da fronteira terrestre. A existência de duas fiadas de pontos em cada molhe facilita a definição destas estruturas nos modelos matemáticos e é apropriada ao tipo de TINs (Triangular Irregular Network) criadas, ou seja, os molhes são introduzidos como se de batimetria se tratasse. Na introdução dos pontos adicionais foi utilizado o ArcView, que permitiu a sobreposição dos pontos cotados sobre o ortofotomapa e, assim, a visualização dos pontos já existentes, bem como a digitalização no monitor.

As duas cartas hidrográficas, “Aproximações a Leixões e à Barra do Rio Douro”; Carta nº26402 do IH, Escala 1:30000; 1<sup>a</sup> Edição, Julho de 2000 e “Caminha a Aveiro”; Carta nº 24201 do IH; Escala 1:150000; 1<sup>a</sup> Edição, Julho de 1999, foram utilizadas para a introdução de novos pontos de batimetria, quer junto ao molhe, quer ao largo. Para tal procedeu-se à sua geo-referenciação através da ferramenta ArcMap, de modo a que se ajustassem ao sistema de coordenadas em que se encontravam os pontos já existentes. A primeira carta desenvolve-se até à batimétrica dos 40m e a segunda atinge a batimétrica dos 3000m; no entanto apenas foram utilizados dados até à batimétrica dos 200m. Atentou-se ao facto de serem simuladas ondas ao largo com propagação de NW e SW, o que resultou na necessidade de informação batimétrica a norte e a sul do porto, Figura 2.

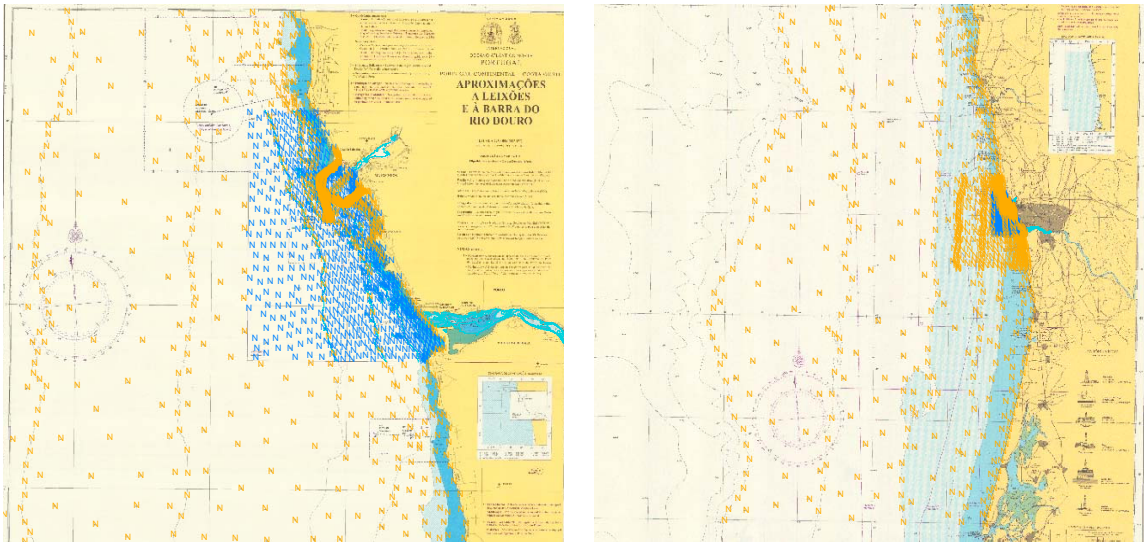


Figura 2. - Introdução de pontos a partir do ArcView até à batimétrica dos 40m (à esquerda) e dos 200m (à direita) utilizando cartas do IH e fazendo a digitalização no monitor.

Através da compilação dos dados dos elementos referidos, cartas hidrográficas e ortofotomapa, obteve-se a caracterização batimétrica do domínio em estudo necessária, para aplicação dos modelos matemáticos já referidos na simulação da propagação das ondas, Figura 3.

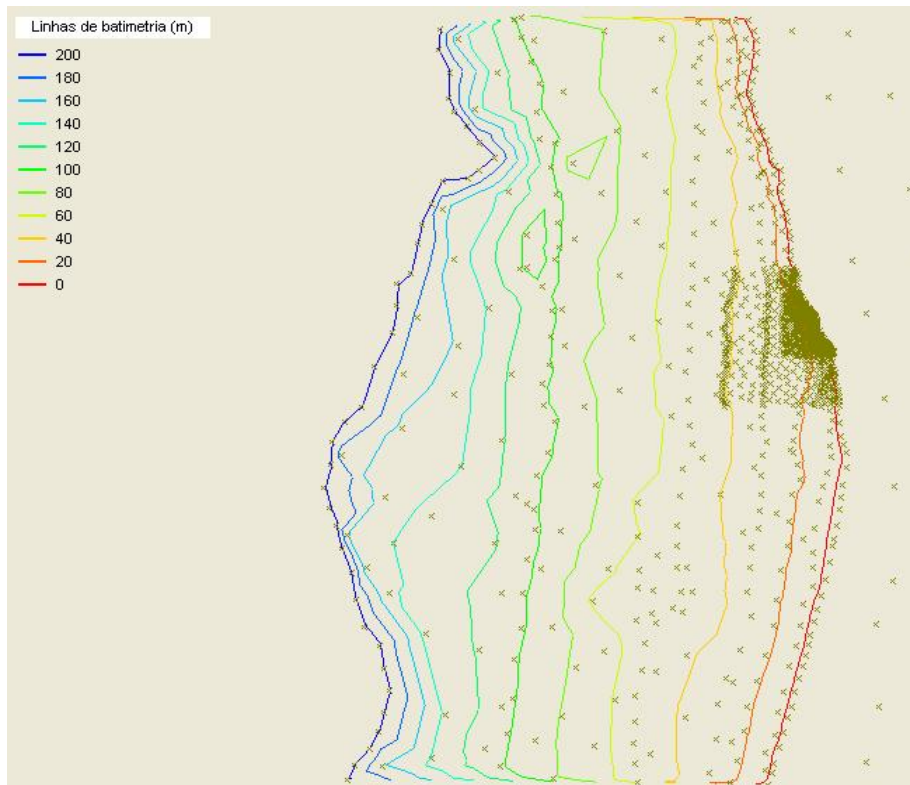


Figura 3.- Batimetria da zona de estudo após compilação dos vários elementos e transferência para o SMS-Surface Modeling System.



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

**3. AGITAÇÃO AO LARGO. MALHA DE CÁLCULO.**

O presente estudo desenvolveu-se em duas fases: na primeira fez-se a simulação da propagação das ondas do largo até cerca de 30 m de profundidade; realizada com o modelo STWAVE, a segunda fase consistiu na simulação da propagação desde os 30 m até à costa com o modelo REF/DIF1.

Em qualquer delas, a discretização do espaço foi efectuada através de malhas de cálculo com células de dimensões constantes  $\Delta x = \Delta y = 50.0$  m, na primeira fase,  $\Delta x = \Delta y = 15.0$  m, na segunda, tendo este último valor em conta a necessidade de se assegurar um mínimo de 5 pontos da malha de cálculo por comprimento de onda, de forma a ser respeitada a resolução de fase do modelo REF/DIF1.

Foram ensaiadas 15 ondas com os valores de altura, período e rumo ao largo que se apresentam no Quadro 1. Estes quinze cenários foram obtidos com base em três rumos (NW, W e W-20°-S), três períodos (10, 14 e 18s) e alturas de onda estabelecidas tendo em conta o seu valor limite correspondente a um estado de completo desenvolvimento, Quadro 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rumo	W	W	W	W	W	NW	NW	NW	NW	NW	W-20°-S	W-20°-S	W-20°-S	W-20°-S	W-20°-S
$T_p$ (s)	10	14	14	18	18	10	14	14	18	18	10	14	14	18	18
$H_{m_0}$ (m)	3.6	5.0	7.0	6.0	10.0	3.6	5.0	7.0	6.0	10.0	3.6	5.0	7.0	6.0	10.0

Quadro 1 – Cenários estudados (Rumo, Período, altura de onda)

Com efeito, na fixação destes parâmetros a “ensaiar”, levou-se em conta a relação que define aquele valor limite da altura significativa em função do período de pico  $T_p$ , num estado de agitação completamente desenvolvido (ver, por exemplo, Coastal Engineering Manual, CEM, USArmy 2002, Parte II, p. 2-45).

$$\frac{H_{m_0}}{gT_p^2} = 3.678 \times 10^{-3}$$

A malha de cálculo encontra-se alinhada com a direcção de propagação da onda ao largo de modo a respeitar as limitações dos modelos relativamente à propagação da energia da onda, do largo para a costa, de  $\pm 87.5$  graus no caso do STWAVE e  $\pm 60$  graus para o REF/DIF1. Por outro lado, estando as malhas alinhadas com a direcção de propagação, o domínio de cálculo considerado não necessita de ser tão vasto, diminuindo-se assim o tempo de cálculo. O nível de maré foi considerado constante e igual a +2.0 m, o que corresponde aproximadamente à meia-maré.

Tendo em vista a avaliação da eventual influência do nível da maré sobre as condições de agitação à entrada do porto, dois dos cenários (rumo ao largo W e N;  $T_p=14.0s$ ,  $H_{m_0} = 5.0m$ ) foram ainda ensaiados para mais dois níveis extremos; + 0.5m (ZH), correspondente a uma baixa-mar viva, e + 4.5m (ZH), correspondente a uma preia-mar viva, afectada por uma sobrelevação meteorológica de alguns decímetros.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

### 4. MODELO STWAVE.

O modelo STWAVE foi desenvolvido pelo Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center. Encontra-se integrado no software SMS: Surface-Water Modeling System (Brigham Young University Engineering Computer Graphics Laboratory (ECGL) 1997). A interface do SMS suporta a geração de malhas, interpolação de campos de correntes, geração do espectro de energia e visualização dos resultados do modelo: alturas de onda, períodos, direcções e espectro gerado.

O STWAVE permite a simulação da refacção, empolamento, rebentação, difracção, interacção vento-onda, interacção onda-onda responsáveis pela redistribuição e dissipação da energia num campo de ondas, bem como a geração de espectros de energia. O STWAVE assume que as “fases relativas” dos componentes espectrais são aleatórias, logo, que a informação de fase não é detectável, sendo assim um modelo de média em fase.

O STWAVE utiliza uma malha quadrada estruturada regular. As células da malha possuem o mesmo tamanho nas duas direcções ( $\Delta x = \Delta y$ ). No caso de ser necessário estudar uma zona com mais pormenor é possível usar modelos encaixados através da simulação da propagação da onda na malha de cálculo geral, guardando os valores do espectro em pontos da malha que irão ser utilizados como condição fronteira na sub-malha encaixada mais fina. As fronteiras laterais do modelo podem ser consideradas como terra ou mar, ou seja, como fronteiras fechadas ou abertas. Para fronteiras abertas a energia propagar-se-á através delas para dentro ou para fora do domínio.

O STWAVE admite um conjunto de hipóteses de base que se resumem seguidamente:

*Reflexão desprezável:* o STWAVE faz a simulação da propagação de energia da onda do largo para a costa, segundo direcções que no máximo podem fazer um ângulo de  $\pm 87.5$  graus com o eixo dos  $xx$  da malha de cálculo, que é normalmente orientada transversalmente à costa e segundo a direcção de propagação da onda. As ondas reflectidas pela linha de costa ou pelo fundo marinho propagam-se para direcções fora deste plano, pelo que são desprezadas. Ondas que se reflectem em estruturas e que se propagam ao longo do eixo dos  $xx$  são também desprezadas.

*Condições homogéneas de onda ao largo:* O espectro de energia ao longo da linha que define a fronteira ao largo de um domínio de cálculo raramente é conhecido. Para domínios da ordem das dezenas de quilómetros, será de esperar que haja pouca variação, pelo que o espectro considerado no STWAVE é considerado constante ao longo da fronteira ao largo.

*Modelo estacionário:* o STWAVE é um modelo estacionário, o que permite reduzir o tempo computacional e se adequa a ondas cujas características variam mais lentamente que o tempo necessário para que se dê a sua propagação. Esta hipótese implica que o vento permaneça estável tempo suficiente para que as ondas se desenvolvam completamente, isto é, a onda não é limitada pela duração do vento.

*Refracção linear e empolamento:* O STWAVE considera a refacção e o empolamento, mas não representa a assimetria de ondas. A precisão do modelo é reduzida para elevados números de Ursell, sendo nestes casos as alturas de ondas calculadas por defeito.

*Uniformidade da corrente com a profundidade:* a interacção onda-corrente considera a presença de uma corrente constante na vertical da coluna de água. Caso ocorram fortes gradientes verticais de velocidade, não são representados pelo modelo.

*Atrito de fundo desprezado:* dado que o STWAVE é aplicado em distâncias relativamente curtas, da ordem das dezenas de quilómetros, o efeito acumulado do atrito de fundo é pequeno, logo não se considera a dissipação de energia provocada pelo atrito de fundo.

O STWAVE utiliza quatro ficheiros de dados. Estes ficheiros especificam respectivamente os parâmetros de controlo do modelo, a batimetria, o espectro de ondas incidente e o campo de correntes. O ficheiro de campo de correntes é opcional, sendo necessário caso seja considerada a interacção onda-corrente.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

### 5. O MODELO REFDIF.

O REF/DIF1, desenvolvido por Kirby e Darlymple (1994), Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, é um modelo de diferenças finitas que se baseia na “mild slope equation” desenvolvida na forma parabólica e em relação à amplitude complexa de uma onda monocromática.

O modelo, de linearidade fraca, que combina refração e difracção, é baseado numa expansão de Stokes e inclui uma correcção de terceira ordem da velocidade de fase; no entanto não considera a teoria de terceira ordem completa, uma vez que não são retidos todos os termos. A altura de onda é conhecida até à segunda ordem (Liu e Tsay, 1984).

A não linearidade das ondas tem efeito sobre a velocidade de fase, podendo assim alterar significativamente os efeitos de refração e difracção. O REF/DIF1 faz a simulação da propagação de ondas monocromáticas em profundidades intermédias, e tem em consideração os efeitos da não linearidade através da teoria de Stokes. Uma vez que o modelo é também usado para simular a onda quando atinge a zona de rebentação, até à fronteira de terra, o modelo sofreu uma correcção de modo a melhorar os resultados face à não aplicabilidade da teoria de Stokes em baixas profundidades. Pode assim ser utilizado um algoritmo que se encontra entre a teoria de Stokes e a teoria linear (Hedges), e que ao contrário da teoria de Stokes não introduz erros na solução para profundidades intermédias. O modelo permite ainda considerar a interacção onda-corrente, que afecta a altura de onda e a direcção de propagação.

O modelo parabólico é resolvido pelo método das diferenças finitas. Deverá assim ser fornecida a batimetria através de uma malha regular, com espaçamento  $\Delta x$  e  $\Delta y$ . A amplitude complexa,  $A(x,y)$ , é então calculada para cada célula pelo método implícito de Crank-Nicolson. Este procedimento é económico relativamente à informação que necessita guardar, já que apenas são necessários valores das linhas  $i$  e  $i+1$ , em cada passo de cálculo.

O REF/DIF1 simula a propagação do campo de ondas em zonas com variação suave de profundidade e corrente, incluindo os efeitos de refração e difracção. Os processos físicos simulados na versão utilizada são os seguintes:

*Aproximação parabólica:* a direcção de propagação está confinada a um sector de  $\pm 70$  graus relativamente à direcção de onda (em relação ao eixo dos  $xx$ ), devido à aproximação parabólica assumida. Os modelos, desenvolvidos na forma parabólica, não simulam as ondas reflectidas.

*Talude de declive suave:* a dedução matemática das equações do modelo assume que variações significativas da cota do fundo só ocorrem em distâncias que são longas em comparação com o comprimento de onda. Em declives até 1:3 o modelo dá bons resultados.

*Não linearidade da onda:* o modelo é baseado na aproximação de Stokes, logo é restrito a aplicações onde as ondas de Stokes são válidas. Uma medida de não linearidade é o número de Ursell:  $U=HL^2/h^3$ ; quando este número é superior a 40, a solução de Stokes deixa de ser válida. De modo a fornecer um modelo válido em águas muito menos profundas, uma relação de dispersão heurística desenvolvida por Hedges (1976) é fornecida como opção no modelo. Esta relação de dispersão entre a frequência e a profundidade é:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh(1 + |A|/h))$$

em que  $A$  é a amplitude complexa.

Em águas pouco profundas esta equação corresponde à da onda solitária, enquanto em águas profundas se aproxima assintoticamente do resultado de onda linear, desprezando os efeitos dispersivos da amplitude real. Por esta razão, no REFDIF1 está incluído um algoritmo intermédio, que se encontra entre a forma de Hedges (válida em águas pouco profundas) e a relação de Stokes (válidas em águas profundas), existindo assim três possibilidades de relações de dispersão: (1) modelo linear; (2) modelo não linear intermédio Stokes/Hedges; (3) modelo de Stokes. A segunda opção é a que cobre um intervalo maior de profundidades e alturas de onda.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

*Rebentação das ondas:* o modelo testa se a altura de onda excede um determinado valor ( $H/h=0.78$ ). Caso exceda, inicia-se o processo de diminuição do fluxo de energia por rebentação das ondas. O amortecimento está construído dentro do algoritmo computacional e é activado automaticamente sempre que o processo de rebentação se iniciar em algum ponto da malha.

*Dissipação de energia:* a dissipação de energia no modelo ocorre de mais que uma maneira, de acordo com a situação que está a ser modelada. Um termo de perda de energia permite ao modelo tratar perdas por atrito num fundo rugoso, poroso ou viscoso, por filmes superficiais, e por rebentação das ondas.

*Fronteira lateral:* a forma como as condições de fronteira são especificadas influencia os resultados do modelo que utiliza a aproximação parabólica. A fronteira ao largo é considerada como tendo profundidade constante.

No modelo REF/DIF1, uma condição de total reflexão é geralmente usada para as fronteiras laterais ( $j=1$  e  $n$ ), o que requer que a escolha da malha de cálculo se faça com critério, pois as ondas reflectidas nas fronteiras laterais poderão atingir a zona de interesse. É recomendado que as simulações iniciais sejam realizadas com condições de reflexão (fronteiras fechadas), de modo a serem estimadas as zonas potencialmente afectadas por este processo. Quando o domínio estiver convenientemente representado, sem influências da reflexão das fronteiras laterais na zona em estudo, as simulações serão então realizadas com as fronteiras abertas.

### 6. TRANSFERÊNCIA STWAVE/REFDIF

Foi necessário proceder à transferência de informação entre o modelo STWAVE e o modelo REF/DIF1, na fronteira entre os dois modelos na batimétrica dos 30m. Para o efeito foi elaborado um programa de cálculo automático em FORTRAN. O programa executa as seguintes operações:

- a) Lê os ficheiros REF/DIF1 e STWAVE.  
O ficheiro STWAVE contém as coordenadas dos pontos onde se registaram os resultados da simulação  $H_{m_0}$ ,  $T_p$  e  $\theta_m$ . O ficheiro REF/DIF1 contém as coordenadas dos pontos da fronteira de entrada do modelo
- b) Para cada ponto da fronteira REF/DIF1:
  - b1)** Calcula a distância a todos os pontos da fronteira STWAVE;
  - b2)** Ordena as distâncias por ordem crescente e toma nota de quais os pontos mais próximos
- c) Faz a projecção do ponto da fronteira REF/DIF1 sobre a fronteira STWAVE de acordo com o esquema que se apresenta na Figura 4.

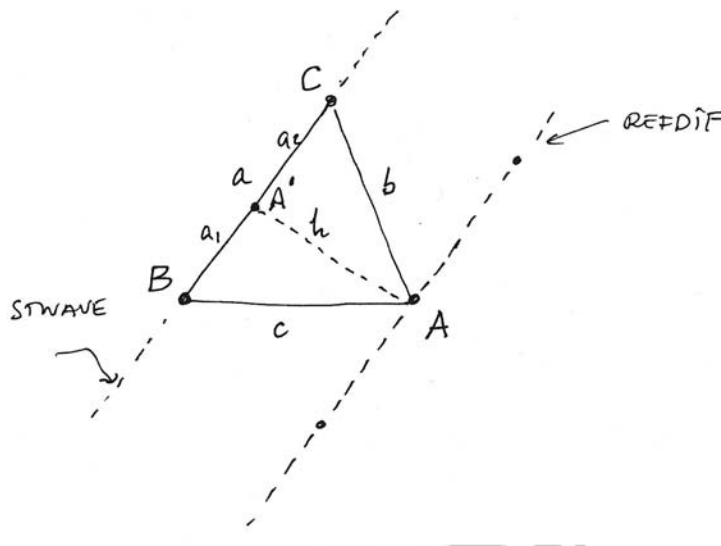


Figura 4 – Transferência informação STWAVE-REF/DIF1

onde,

$$h = \frac{2}{a} \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$$

$$p = \frac{a+b+c}{2}$$

$$a_1 = \sqrt{c^2 - h^2}$$

$$a_2 = \sqrt{b^2 - h^2}$$

d) Conhecida a projecção A' do ponto A calcula as grandezas  $a_1$  e  $a_2$  e interpola linearmente o valor das grandezas  $H_{m_0}$ ,  $T_p$  e  $\theta_m$ .

e) Conhecidos os valores na fronteira REF/DIF1 calcula a amplitude complexa

Se se tiver um campo de ondas com altura  $2a(y)$  e direcção  $\theta(y)$  na fronteira exterior onde a profundidade é  $h(y)$ , a amplitude complexa é calculada da seguinte forma (REF/DIF1, 1994):  
A expressão

$$\frac{2\pi}{T} = (gk \tanh kh)^{1/2}$$

permite calcular o número de onda  $k(y) = \frac{2\pi}{L}$ , onde T é o período e L o comprimento de onda.

A amplitude complexa A é definida então por:

$$A(y) = a(y)e^{i\psi(y)}$$



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

onde:

$$\psi(y) = \int_{y=0}^y k(y) \sin \theta(y) dy$$

Os valores discretos  $A(j)$  são dados por:

$$A(j) = A(y_j); j = 1, \dots, n$$

### 7. EXEMPLO DE SIMULAÇÕES.

Foram estudados quinze cenários correspondentes a diferentes rumos ao largo, períodos e alturas de onda conforme se apresenta no Quadro 1. Todas as simulações respeitam ao nível médio +2.0 ZH. Adicionalmente, e para avaliar a influência do nível de maré nos resultados, seleccionaram-se dois cenários (W,14s,5m) e (NW,14s,5m) que foram também ensaiados para os níveis de baixa mar e preia-mar. Com estes quatro cenários adicionais o número total de cenários estudados passou a ser de dezanove.

Os resultados de propagação do STWAVE são expressos por campos de altura de onda e da direcção média através de um campo de vectores com módulo proporcional à altura de onda. Os resultados locais obtidos através do REF/DEF1, são expressos pela altura de onda, direcção média e amplitude complexa, podendo observar-se o padrão de propagação com uma representação das cristas e cavas. Na Figuras 4a a 4e e 5a a 5e apresentam-se como exemplo o resultado da simulação para o Cenário 5 (W,18s, 10m) e para o Cenário 15 (W-20°-S,18s,10m). Nas Figuras 4d e 5d pode observar-se o efeito da condição de fronteira de entrada no domínio transposta do Modelo STWAVE. Note-se que a direcção de propagação da onda é oblíqua à fronteira de entrada do domínio de cálculo.

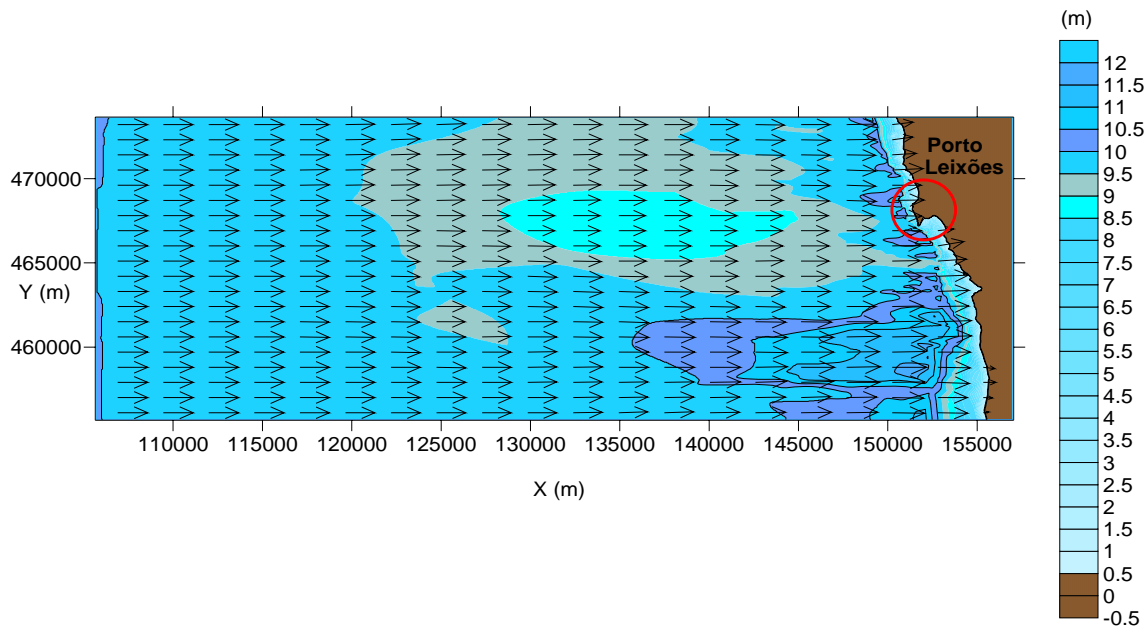


Fig 4a.) Altura e da direcção da onda (rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m_0}=10.0m$ )



4<sup>a</sup>s Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

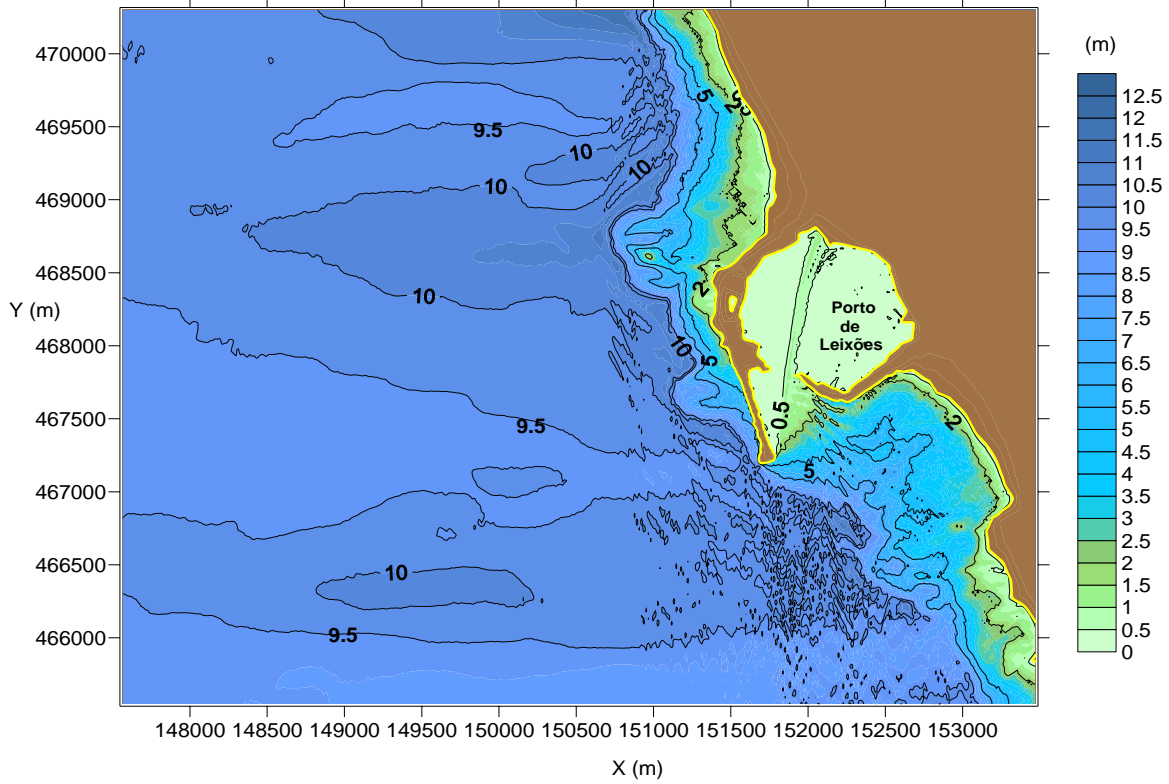


Fig 4b.) Isolinhas da altura da onda (rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m_0}=10.0m$ ). Zona próxima

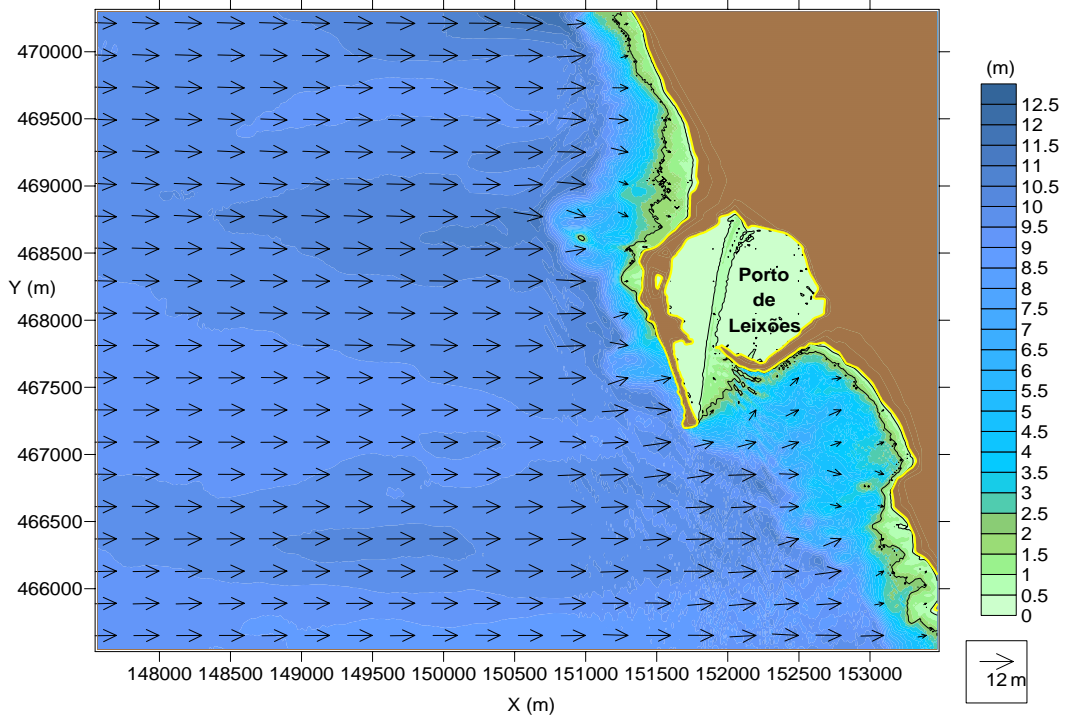


Fig 4c.) Altura e direcção da onda (rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m_0}=10.0m$ ). Zona de aproximação.

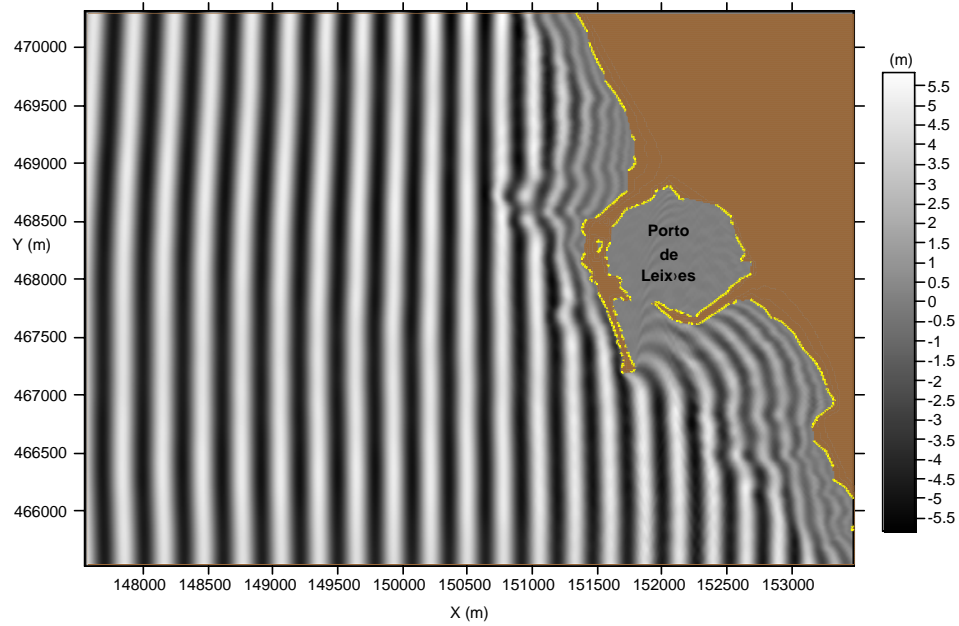


Fig 4d.) Padrão de propagação da onda (rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m0}=10.0m$ )

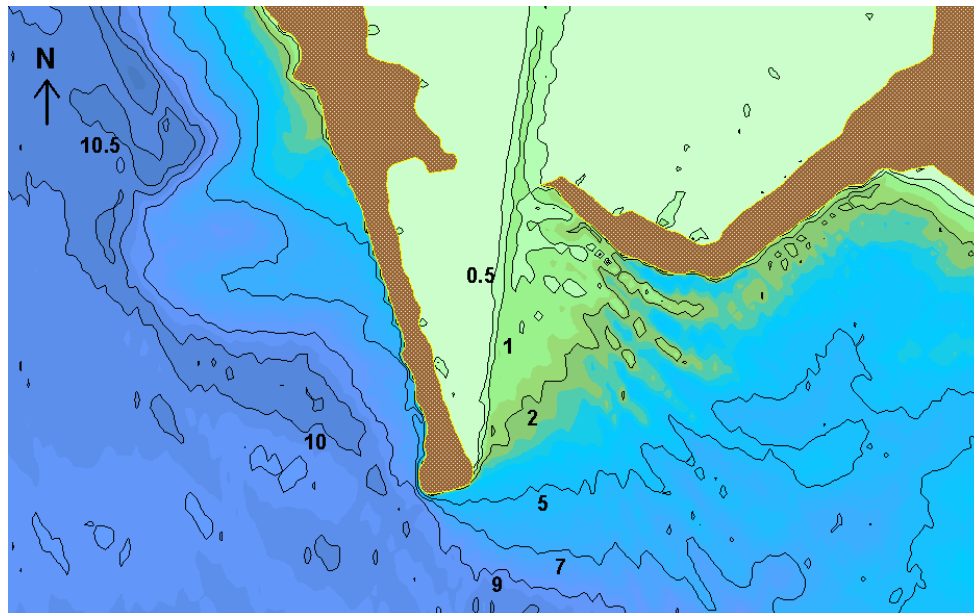


Fig 4e.) Isolinhas da altura da onda (rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m0}=10.0m$ ). Zona da entrada do porto

Figura 4. Cenário 5: Rumo W,  $T_p=18.0s$ ,  $H_{m0}=10.0m$ , Nível Médio (+2 ZH)











