



MELHORIA DAS CONDIÇÕES DE ABRIGO NA MARINA DA PÓVOA DE VARZIM. ESTUDOS EM MODELO MATEMÁTICO.

Inês Pipa⁽¹⁾, António Trigo Teixeira⁽²⁾

⁽¹⁾ WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.

Rotunda Nuno Rodrigues dos Santos, 1B – 10º, 2685-223 Portela LRS

inespipa@wwsa.pt

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais 1049-101, Lisboa

alex@civil.ist.utl.pt

RESUMO

Um porto define-se como uma área abrigada das ondas e das correntes marítimas, que se destina ao atracamento de embarcações. É de extrema importância que seja garantida a tranquilidade no seu interior, qualquer que seja o estado de agitação marítima que exista ao largo, para que as embarcações possam usufruir das condições que estes oferecem. As ondas geradas pelo vento são o principal factor no movimento dos barcos atracados, causando mais esforços nas amarras e estruturas do cais.

Especialmente na época de Inverno verifica-se um agravamento da agitação marítima junto à costa norte de Portugal, sendo o funcionamento da marina da Póvoa Varzim afectada por este agravamento. Com o presente trabalho pretende-se propor soluções que sejam possíveis de implementar no futuro, para que a marina possa funcionar sem condicionantes.

Para efectuar este estudo recorreu-se ao modelo numérico CGWAVE, que é um modelo 2D de elementos finitos que tem por base a *mild slope equation* e é correntemente utilizado para estudar a propagação das ondas desde o largo até ao local de interesse em estudo. Foram analisadas diversas soluções com diferentes condições de agitação ao largo, consideradas como potencialmente mais gravosas, de forma a escolher uma solução que garantisse a tranquilidade na marina. Analisaram-se seis alternativas diferentes, consistindo umas no prolongamento das obras de abrigo já existentes, outras na construção de novas obras de abrigo.

O CGWAVE tem em conta os efeitos da difracção e de reflexão, dois dos fenómenos envolvidos na propagação das ondas dentro de uma bacia portuária protegida por quebra-mares. É necessário fornecer ao modelo as características da onda ao largo (altura significativa, período de pico e rumo) e, de entre os vários resultados obtidos, é possível saber qual a altura de onda em todos os pontos do domínio definido e observar a propagação da onda desde o largo até à linha de costa.

Os resultados obtidos demonstraram que algumas das soluções propostas vão de encontro ao que era pretendido, ou seja, garantir a tranquilidade na zona da marina da Póvoa de Varzim.



1. Introdução

Um porto define-se como uma área abrigada das ondas e das correntes marítimas, que se destina ao atracamento de embarcações. Os portos podem ser de pesca, de recreio ou comércio. É de extrema importância que seja garantida a tranquilidade no seu interior, qualquer que seja o estado de agitação marítima que exista ao largo, para que as embarcações possam usufruir das condições que estes oferecem. As ondas geradas pelo vento são o principal factor no movimento dos barcos atracados, causando mais esforços nas amarras e estruturas do cais.

Especialmente na época de Inverno verifica-se um agravamento da agitação marítima junto à costa norte de Portugal, sendo o funcionamento da marina da Póvoa Varzim afectada por este agravamento.

É, assim, essencial no dimensionamento de um abrigo portuário um estudo cuidadoso, por parte do especialista em engenharia costeira, da agitação marítima do local. Para que o abrigo portuário funcione sem condicionantes, é necessário garantir que as alturas de onda no seu interior não ultrapassem determinados valores, definidos para cada porto consoante o tipo de embarcações que os frequentam, o tipo de porto e o período de pico da onda.

Para o estudo da agitação marítima dentro do porto pode recorrer-se a modelos numéricos que simulam a propagação das ondas ou a modelos físicos reduzidos que representem o local de estudo. O ideal, neste tipo de projectos, seria realizar um estudo numérico e físico e compará-los com medições de ondas realizadas no local.

Existem vários modelos numéricos, baseados em diferentes equações, que possibilitam a modelação da geração e propagação das ondas do largo até à costa e portanto, o conhecimento das suas características no local de interesse. Apesar das suas grandes potencialidades, muitos destes modelos apresentam certas limitações, como por exemplo o facto de apenas modelarem ondas monocromáticas, ondas que dificilmente se encontram na natureza. No entanto, as lacunas referidas começam a ser preenchidas com o desenvolvimento de alguns modelos que possibilitam o estudo de ondas não lineares, como por exemplo o modelo SWAN (Booji et al., 1999).

O modelo CGWAVE, utilizado no trabalho realizado, é um modelo 2D de elementos finitos que tem por base a *mild slope equation* e é correntemente utilizado para estudar a propagação das ondas desde o largo até ao local de interesse em estudo. O CGWAVE tem em conta os efeitos da difracção e de reflexão, dois dos fenómenos envolvidos na propagação das ondas dentro de uma bacia portuária protegida por quebra-mares. É necessário fornecer ao modelo as características da onda ao largo (altura significativa, período de pico e rumo) e, de entre os vários resultados obtidos, é possível saber qual a altura de onda em todos os pontos do domínio definido e observar a propagação da onda desde o largo até à linha de costa.

2. Difracção e reflexão

A propagação das ondas no interior de um porto é um processo muito complexo que envolve reflexão, refracção e difracção. No caso particular em estudo, a difracção e reflexão são os fenómenos que mais afectam a entrada da agitação marítima para o interior do porto.

A difracção é o fenómeno que mais afecta as condições de propagação da onda no interior de um porto. Está directamente relacionada com a transmissão lateral de energia da onda dentro do porto.

Considere-se uma onda que passa por uma abertura. A energia desta onda vai propagar-se em todas as direcções, sendo esta transferida dos pontos de maior altura de onda para os de menor. A altura de onda decresce não só da zona frontal à abertura para as zonas laterais,



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

como também diminui para dentro do porto. Este é o processo que está relacionado com a difracção da onda.

Ao longo dos anos foram apresentadas algumas teorias para explicar melhor este complexo fenómeno. Todas elas foram elaboradas para ondas monocromáticas, tendo por base as mesmas hipóteses.

Hoje em dia, as soluções analíticas são as mais requeridas para estudar este fenómeno, tanto na fase de projecto como na fase de ante-projecto, já que a sua utilização é bastante facilitada através da aplicação de diagramas que traduzem o efeito da difracção. Nestes diagramas o efeito da difracção é representado através de linhas de igual coeficiente de difracção, K_d , que é dado pela seguinte relação:

$$K_d = \frac{H_i}{H_e} \quad (2.1)$$

onde,

H_i – a altura da onda num ponto interior da zona afectada pelo obstáculo;

H_e – a altura da onda exterior à zona afectada pelo obstáculo.

Sempre que exista uma pequena alteração na profundidade da água à medida que a onda se propaga, parte da energia da onda é reflectida. O grau de reflexão é traduzido pelo coeficiente de reflexão, R , dado pela seguinte relação:

$$R = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.2)$$

onde,

H_r – a altura da onda reflectida;

H_i – a altura da onda incidente.

Pode dizer-se que um obstáculo tem maior capacidade reflectora quanto menor for quantidade de energia da onda incidente dissipada. A capacidade reflectora de um obstáculo depende da sua rugosidade, porosidade e inclinação. Para além destas características do obstáculo, a capacidade reflectora depende ainda das características da própria onda incidente: altura e comprimento de onda. Estas características estão relacionadas através de um parâmetro adimensional, número de Iribarren, ξ :

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\delta}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_i}{L}}} \quad (2.3)$$

onde,

ξ – número de Iribarren;

$\tan \theta$ – inclinação;

H_i – altura da onda incidente;

L – comprimento de onda.



3. Modelo CGWAVE

O modelo CGWAVE foi desenvolvido pela Universidade de Maine para o U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. É um modelo 2D de elementos finitos com interface no programa Surface-water Modelling System, SMS (Jones & Richards, 1992), que tem por base a "mild slope equation".

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (3.1)$$

onde,

$C(x,y)$ – é a celeridade da onda ($C=\sigma/k$);

$C_g(x,y)$ – é a celeridade de grupo;

$\hat{\eta}$ - é o potencial da onda, a partir do qual a altura de onda pode ser estimado;

σ – é a frequência da onda (em rad/s);

k – é o número de onda, que está relacionado com a profundidade, $d(x,y)$, do local através de uma relação de dispersão linear:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.2)$$

Este modelo pode ser aplicado para pequenas e grandes profundidades, permitindo assim a modelação de grandes extensões de regiões costeiras. Podem ser simuladas ondas monocromáticas e espectrais, uma vez que é possível a aplicação do modelo numa elevada gama de frequências.

São possíveis três tipos de domínio no CGWAVE: rectangular, semi-circular e circular. Depois de estar criado o modelo é necessário introduzir três condições de fronteira no programa: amplitude, direcção e período de pico da onda, para que se possam obter resultados. São vários os resultados que se podem obter com este modelo, entre os quais se destacam a altura, fase e celeridade da onda.

4. Situação de referência

O porto da Póvoa de Varzim localiza-se na cidade da Póvoa de Varzim e é um porto completamente artificial. Este começou a ser construído na década de 1950, servindo como porto de pesca.

Actualmente, este porto tem diversas funcionalidades e encontra-se aberto para Sul. A zona norte do porto serve embarcações de pesca, enquanto que a zona sul é destinada a embarcações de recreio, tendo esta zona a capacidade para cerca de 250 embarcações. A área destinada à pesca é constituída por um armazém, uma lota e um cais, onde existem vários pontões de amarração para as embarcações. A zona de recreio é apoiada por várias infra-estruturas necessárias para garantir o bom funcionamento da marina da Póvoa de Varzim.

O porto é ainda composto por um quebra-mar na zona norte, com cerca de 900 metros, revestido com tretápodos e cubos artificiais pelo coroamento exterior e por enrocamento na parte interior. Na boca de entrada do porto, existe um talude revestido com material bastante absorvente para que possam ser evitados os fenómenos de reflexão para dentro do mesmo.

Toda a zona norte do porto é constituída por paredes verticais e taludes de retenção marginal, havendo um pequeno areal para sul a seguir ao local onde as embarcações de pesca atracam.

Depois do areal há de novo uma zona de retenção marginal, que como se verifica pela Figura 1, corresponde ao local onde se encontram os lugares destinados às embarcações de recreio.

A zona sul do porto é abrigada por um quebra-mar monolítico de betão, com cerca de 800 metros de comprimento, sendo o coroamento exterior constituído por blocos de enrocamento e o coroamento interior por um pequeno talude suave.



Figura 1 – Porto da Póvoa de Varzim [Fonte: Google Earth and <http://upload.wikimedia.org>]

Infelizmente têm-se verificado alguns problemas de agitação na zona sul, impedindo que a capacidade do porto seja aproveitada em toda a sua plenitude, principalmente na época de Inverno.

Pretendeu-se, assim, com o estudo realizado analisar soluções que permitam melhorar o abrigo portuário, impedindo que a agitação marítima atinja a zona sul do porto, para que se possa usufruir de todas as capacidades que o porto da Póvoa de Varzim possui, aumentando assim a capacidade para receber embarcações de recreio.

5. Setup do modelo

O primeiro passo dado foi construir um modelo que representasse o porto da Póvoa de Varzim, bem como a zona exterior envolvente. Começou por se obter a batimetria do local, cujos dados tiveram origens diferentes, tendo sido por isso necessário proceder ao seu correcto tratamento, para que a batimetria final se assemelhasse à batimetria real. Duas das origens dos dados foram fornecidas em formato digital e com as coordenadas relativas ao Sistema de Coordenadas do Exército, Datum de Lisboa:

- Levantamento de 1990, feito pelo Instituto Hidrográfico;
- Levantamento Batimétrico: Barra e Canal de Acesso ao Porto da Póvoa de Varzim, 31 de Outubro/ 1 de Novembro de 2006, efectuado pela empresa Hidrodata.

Como estes dois levantamentos não continham informação suficiente para caracterizar a batimetria exterior do modelo, fez-se uma digitalização do mapa:

- “Caminha a Aveiro”; Carta nº24201 do Instituto Hidrográfico; Escala 1:150000; 1ªEdição, Julho de 1999.

para gerar novos pontos de batimetria junto ao porto e ao largo, utilizando informação até à batimétrica dos 40 m.

Tendo disponíveis todos os dados necessários para a construção da batimetria do modelo, procedeu-se à compilação das três batimetrias existentes, tendo sido obtida a caracterização batimétrica do domínio em estudo, representada na Figura 2. No processo de compilação foram seguidas duas condições:

- nunca se misturaram pontos de “scatter” diferentes;
- sempre que havia pontos sobrepostos, utilizaram-se os dados do levantamento mais recente.

O ideal para que a batimetria estivesse completa era ter sido feito um levantamento único, mas como tal não era compatível com o prazo para a realização do trabalho e existiam condições para prosseguir com o estudo com os dados disponíveis, dispensou-se um levantamento batimétrico mais rigoroso.

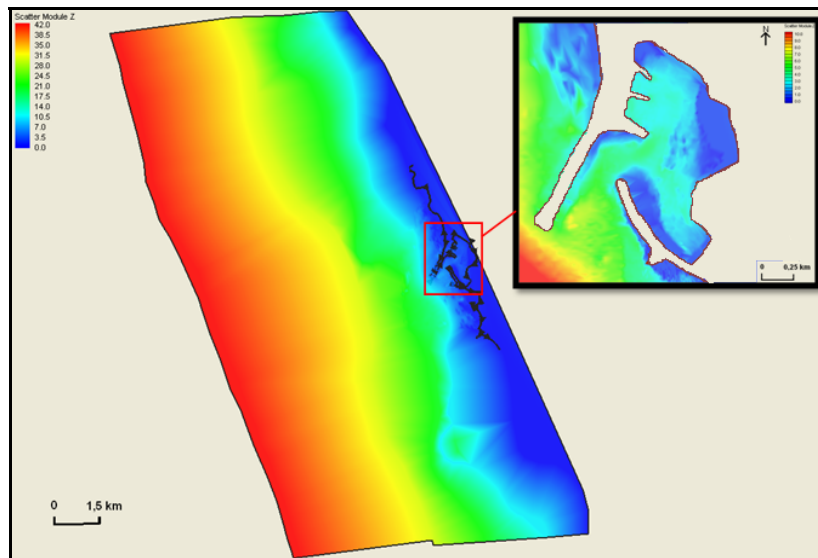


Figura 2 - Porto da Póvoa de Varzim: Batimetria do domínio em estudo

Após estar construída a batimetria, traçou-se a fronteira terrestre do modelo. Para que esta ficasse definida de forma mais precisa, recorreu-se ao auxílio de dois ortofotomapas, nos quais está representado o porto da Póvoa de Varzim. Os ortofotomapas foram obtidos no Instituto Geográfico Português e vinham georreferenciados ao Datum 73, ponto Central. Como a batimetria tinha as coordenadas relativas ao Sistema de Coordenadas do Exército, Datum de Lisboa, foi necessário passar os ortofotomapas para este sistema de coordenadas.

O modelo CGWAVE possibilita a pormenorização das condições de fronteira na fronteira oceânica e na fronteira terrestre. O modelo permite ter em conta o coeficiente de reflexão, como característica da fronteira terrestre.

Os coeficientes de reflexão são escolhidos consoante o tipo de material que constitui a linha de costa e o contorno portuário, oscilando desde 0,0 para uma praia de talude suave até 1,0 para uma parede vertical.

Os valores dos coeficientes de reflexão foram adoptados em função dos valores utilizados num trabalho desenvolvido para o porto de Leixões (Hartwing, 2005).

Tabela 1– Coeficientes de reflexão utilizados nas simulações. (Adaptado: Hartwing, 2005)

Material da Linha de Costa	Coefficiente de Reflexão
Praia	0,10
Talude suave	0,25
Retenção Marginal	0,25
Enrocamento	0,25
Tetrápodos	0,33
Paredes Verticais	0,90

Foi necessário definir uma condição de fronteira ao largo para se obter um domínio finito e assim possibilitar a resolução do problema. Esta fronteira deve ser escolhida de forma a não influenciar os resultados do modelo na zona em estudo. Foram, por isso, testadas várias posições de fronteira oceânica para as mesmas condições de agitação.

A posição da fronteira oceânica não influencia os resultados a partir do momento em que as alturas de ondas para cada ponto se mantêm constantes. Foram simuladas cinco condições de fronteira ao largo, indicadas na Figura 3, optando-se pela condição de fronteira correspondente ao “Run 4”, que abrange uma área de cerca de 9,2 km².

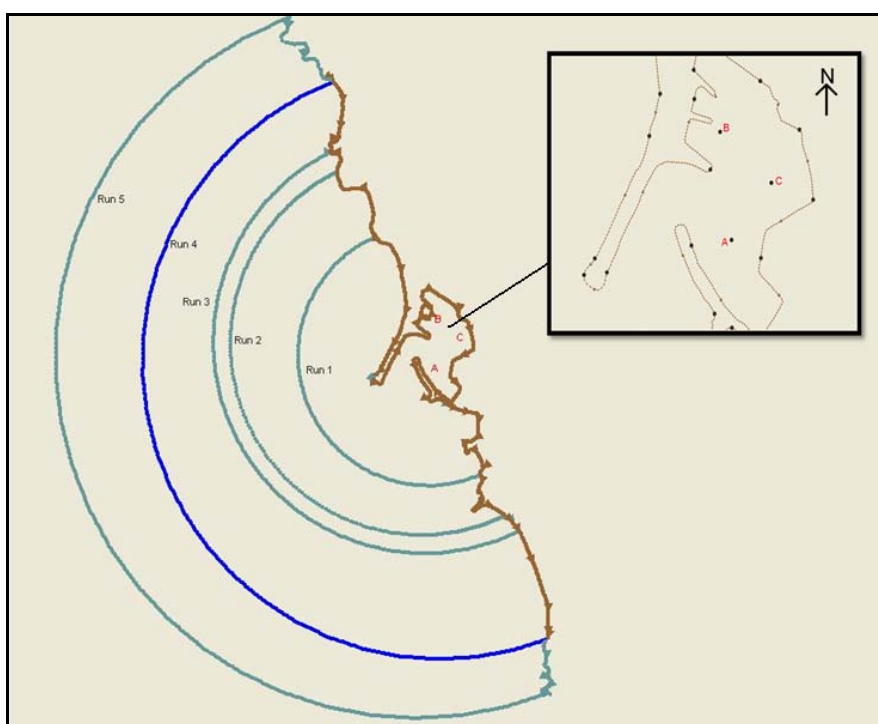


Figura 3 - Porto da Póvoa de Varzim: estudo do posicionamento da fronteira oceânica.

Depois de definidas as fronteiras do domínio, foi criada uma malha de elementos finitos com ajuda do software *Surface-Water Modeling System* (SMS). Este software permite gerar diferentes tipos de malhas de elementos finitos. O método escolhido para gerar a malha para o



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

caso em estudo foi o *Scalar Paving Density*. Esta escolha foi baseada na análise efectuada num trabalho realizado para o porto de Leixões (Hartwing, 2005),

O domínio da malha é criado a partir de uma *size function* gerada no programa. Este domínio é transformado num polígono que contém uma dada densidade de elementos e que é gerado considerando um certo número de pontos por comprimento de onda. O comprimento de onda em cada ponto do *scatter set* é determinado a partir da profundidade correspondente, de onde se pode concluir que um comprimento de onda maior corresponde a uma maior profundidade. É a função comprimento de onda que determina o tamanho dos elementos que irão constituir a malha. A cada ponto é atribuída uma dada dimensão, que corresponde, aproximadamente, ao tamanho dos elementos que são gerados na região onde o ponto se encontra. Assim, a malha nas zonas menos profundas será mais densa. Optou-se por utilizar nas simulações efectuadas 10 pontos por comprimento de onda, apresentando a malha, em todo o domínio, cerca de 76138 elementos.

6. Caso de estudo

6.1. Enquadramento

O objectivo principal do estudo realizado foi propor soluções que pudessem melhorar as condições de abrigo na marina da Póvoa de Varzim, como já foi referido, uma vez que existem alguns problemas de agitação marítima, que não permitem que a marina seja utilizada em toda a sua capacidade.

São vários os factores que podem contribuir para a agitação sentida nesta zona:

- a energia das ondas que chegam ao porto não ser completamente dissipada, provocando alguma agitação dentro do porto;
- o galgamento que por vezes se verifica do molhe sul, que pode levar à criação de ondas no interior do porto;
- o facto de a marina se encontrar perto da entrada do porto e as embarcações, quer sejam recreativas ou de pesca, ao entrarem no porto produzam ondas que causem uma certa agitação, que perturbe este local particularmente.

Para que a tranquilidade seja garantida na marina existem critérios que estipulam a altura máxima que as ondas devem ter neste local. Tem sido utilizado com frequência “o critério dos 30 cm”. No entanto, existe um critério, recomendado pela PIANC (Associação Internacional de Navegação), que estipula, dependendo do comprimento da embarcação e do período das ondas, um valor limite para as alturas de onda em portos de recreio (Tabela 2). Qualquer um destes critérios deve ser considerado no planeamento de um porto de recreio para tentar evitar possíveis problemas de funcionamento no futuro.



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

Tabela 2– Alturas de onda limite em portos de recreio. Critério recomendado pela PIANC.
(Adaptado: PIANC, 1997)

Comprimento da embarcação (m)	Ondas de través		Ondas de proa	
	Período (s)	H _s lim (cm)	Período (s)	H _s lim (cm)
4 - 10	< 2	20	< 2,5	20
	2 - 4	10	2,5 - 4	15
	> 4	15	> 4	20
10 - 16	< 3	25	< 3,5	30
	3 - 5	15	3,5 - 5,5	20
	> 5	20	> 5,5	30
20	< 4	30	< 4,5	30
	4 - 6	15	4,5 - 7	25
	> 6	25	> 7	30

O tamanho das embarcações que podem frequentar a marina da Póvoa de Varzim está regulamentado no ponto 4, do artigo 3º do capítulo II do Regulamento de Utilização da Marina da Póvoa:

“É vedado o acesso à Marina de barcos com mais de 18 metros de comprimento fora a fora, 11 metros de boca e ou o calado superior a 3 metros, salvo autorização especial da Autoridade Marítima a solicitação prévia dos responsáveis da Marina.”

O estudo foi realizado para ondas geradas pelo vento (ondas de *swell*), cujo período no local poderá variar entre 6 e 18 s. Assim, a altura de onda máxima no interior do porto de recreio deve ser inferior a 20 cm, caso a onda atinja uma embarcação de través, ou, 30 cm, no caso de a onda embater na embarcação pela proa. Verifica-se que a pior situação é quando a onda ataca o barco lateralmente.

Os parâmetros utilizados para a caracterização da agitação marítima no trabalho desenvolvido foram escolhidos com base num trabalho realizado pela CEHIDRO para o estudo da agitação à entrada do porto de Leixões, dada a proximidade de Leixões e da Póvoa de Varzim. Foram assim efectuadas simulações para ondas com rumos NW, W e W-20°S, períodos de pico de 14,0 e 18,0 s e alturas de onda significativas na fronteira oceânica de:

- $H_{m0} = 7,00$ m e $H_{m0} = 5,00$ m para $T_p = 14,0$ s;
- $H_{m0} = 10,0$ m e $H_{m0} = 6,00$ m para $T_p = 18,0$ s.

A maneira mais eficaz de resolver o problema de agitação existente consiste em construir obras de protecção adicionais. Estas obras de abrigo podem ser feitas pelo interior ou pelo exterior do porto. Foram, assim, testadas 4 soluções diferentes, duas obras de abrigo pelo exterior (solução A e B) e duas pelo interior (solução C e D), para tentar melhorar as condições de utilização da marina (Figura 4 e Figura 5).

Tabela 3 – Soluções ensaiadas.

Soluções ensaiadas			
Exterior	A	A1	Prolongamento do molhe norte em cerca de 185 m, mantendo a mesma direcção do quebra-mar existente.
		A2	Prolongamento do molhe norte em cerca de 180 m, considerando-se o prolongamento um pouco curvado.
	B	B1	Construção de um contra-molhe no molhe sul com 250 m.
		B2	Construção de um contra-molhe no molhe sul com 295 m.
Interior	C	Construção de um quebra-mar com 100 m, ligado à cabeça do molhe sul, perpendicular a este.	
	D	Construção de dois quebra-mares destacados, com 45 m cada um, perpendiculares ao molhe sul.	

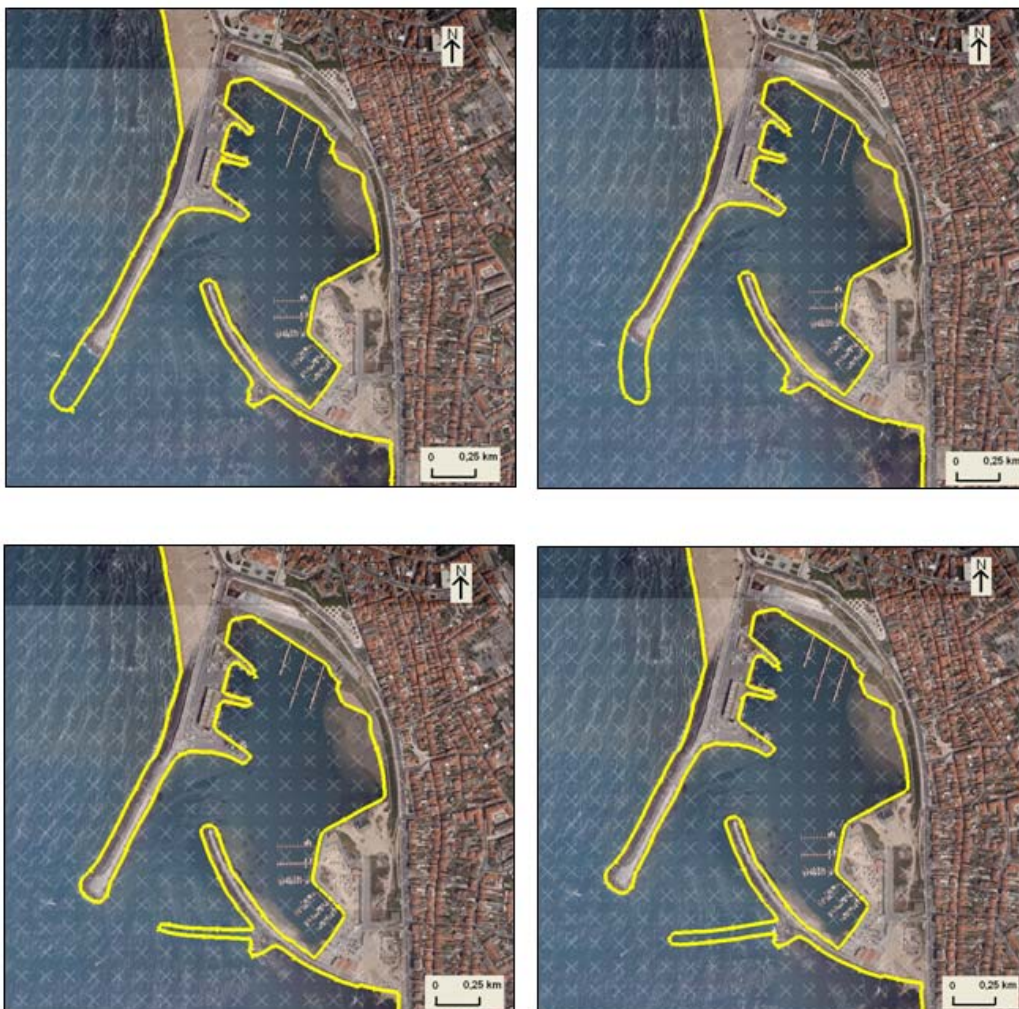


Figura 4 – Porto da Póvoa de Varzim. Representação esquemática das soluções pelo exterior: Solução A1 – em cima à esquerda; Solução A2 – em cima à direita; Solução B1 – em baixo à esquerda; Solução B2 – em baixo à direita.

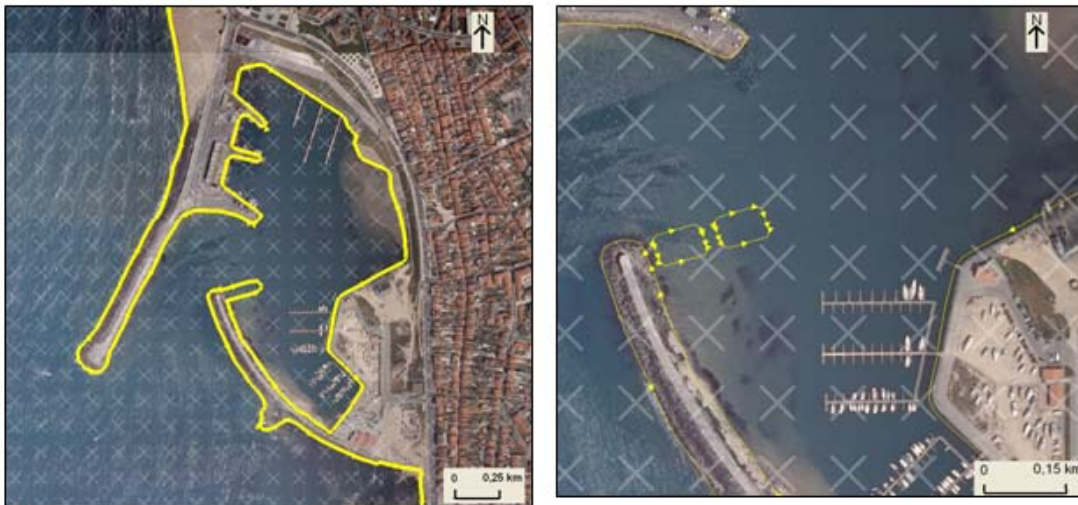


Figura 5 – Porto da Póvoa de Varzim. Representação esquemática das soluções pelo interior:
Solução C (esquerda); Solução D (direita)

Inicialmente foram feitas, para cada um dos rumos e para ondas com $T_p=14,0$ s, simulações em relação ao nível médio (NM) das águas do mar para a situação actual, que se tomou como de referência e para as diferentes soluções propostas. O nível médio das águas do mar no local de estudo encontra-se 2,0 m acima do zero hidrográfico, segundo a Tabela de Marés. Através da análise destes resultados escolheu-se a melhor solução pelo exterior e a melhor pelo interior. De seguida, para estas duas soluções efectuaram-se simulações para o nível de preia-mar (PM), que se encontra 3,95 m acima do zero hidrográfico, e tendo em conta o efeito do atrito de fundo. Em nenhum dos casos foi considerada a rebentação.

Como o valor que caracteriza o atrito de fundo é bastante difícil de quantificar, optou-se por analisar dois casos extremos:

- fundo rugoso, com grandes quantidades de vegetação;
- fundo liso, com pouca vegetação.

Para o primeiro caso adoptou-se $n=0,12$ (Hartwing, 2005) e para o segundo $n=0,05$ (Chow, 1981). Assim, analisando estas duas situações consegue-se perceber se o efeito do atrito de fundo influencia os resultados. No entanto, o valor mais baixo caracteriza melhor a situação do porto da Póvoa de Varzim, que tem um fundo de areia pouco rugoso e com pouca vegetação.

Na Tabela 4 apresenta-se um resumo dos cenários estudados para as diferentes situações analisadas.



Tabela 4 - Cenários estudados para os rumos NW, W-20°S e W.

	NM				PM	
	T _p =14,0 s e: - H _{m0} =5,00m - H _{m0} =7,00m	T _p =18,0 s e: - H _{m0} =6,00m - H _{m0} =10,00m	T _p =14,0 s H _{m0} =1,00m; n=0,12	T _p =14,0 s H _{m0} =1,00m; n=0,05	T _p =14,0 s e: - H _{m0} =5,00m - H _{m0} =7,00m	T _p =18,0 s e: - H _{m0} =6,00m - H _{m0} =10,00m
Situação de referência	X	X	X	X	X	X
Soluções propostas (A, B, C, D)	X					
Melhor solução pelo exterior e pelo interior		X	X		X	X

Para cada uma das simulações efectuadas para os diversos cenários estudados, analisaram-se três pontos específicos no interior do porto (A, B, C). O ponto A situado na zona da marina, mais especificamente, no lugar de amarração mais próximo da boca de entrada do porto; o ponto B situado na zona destinada às embarcações de pesca e o ponto C situado na zona frontal à entrada do porto.

6.2. Apresentação dos resultados

A apresentação dos resultados das simulações efectuadas para os cenários anteriormente descritos é feita através de diagramas de fase e de diagramas de alturas de onda.

Os diagramas de fase permitem ver a forma como a onda se propaga para o interior do porto (Figura 6). Permitem, também, ver de maneira bastante nítida os fenómenos de reflexão e difracção da onda quando esta entra em contacto com as obras de abrigo. Com os diagramas de altura é possível ver a distribuição das alturas de onda na zona abrangida pelo modelo de cálculo.

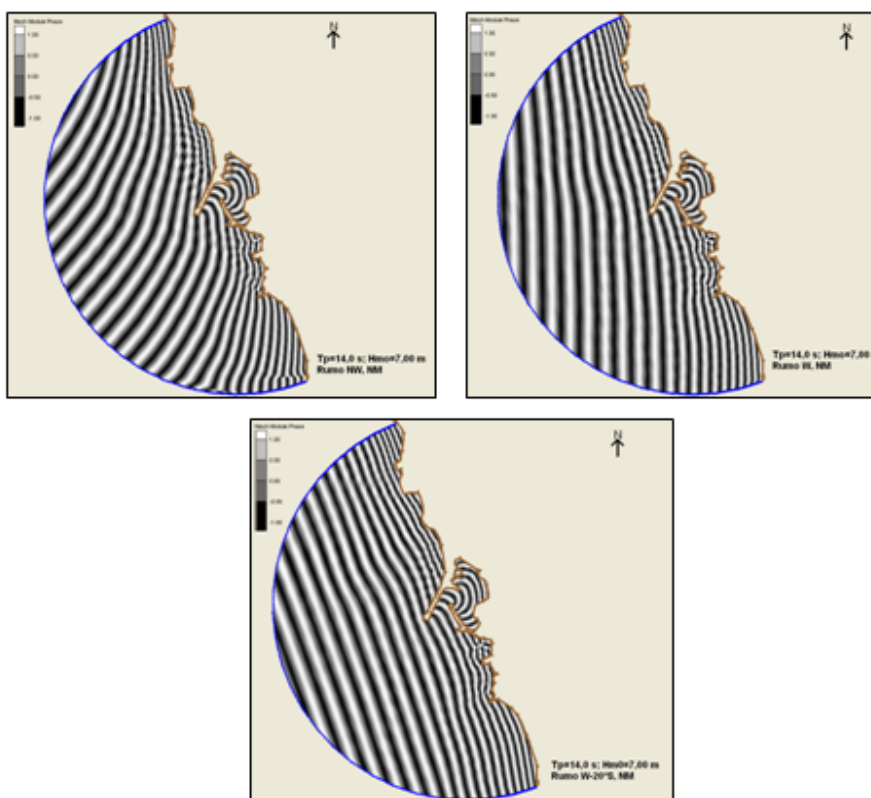


Figura 6 – Porto da Póvoa de Varzim. Diagramas de fases.

Na Figura 7 encontram-se representados alguns dos diagramas de altura de onda obtidos, correspondendo os representados às simulações para ondas com $T_p=14,0s$, $H_{m0}=7,00$ e direcção $W-20^\circ S$.

Por observação dos diagramas seguintes e análise dos resultados obtidos, concluiu-se que as melhores soluções de abrigo são a solução A2 pelo exterior e a solução C pelo interior. No entanto, tanto a solução C como a solução D apresentam resultados muito semelhantes e relativamente aceitáveis, havendo uma melhoria significativa da tranquilidade no interior do porto na zona da marina. Já era de esperar que o prolongamento do molhe norte (solução A2) fosse uma solução eficaz, dada a orientação das ondas no local em estudo, no entanto, esta solução não parece ser muito viável, dado os elevados custos de uma obra deste tipo. Relativamente às duas variantes estudadas na solução B, onde se esperava que os resultados fossem favoráveis, não melhoram em nada as condições de agitação da marina, sendo mesmo as hipóteses que piores resultados apresentaram, para qualquer uma das simulações efectuadas.

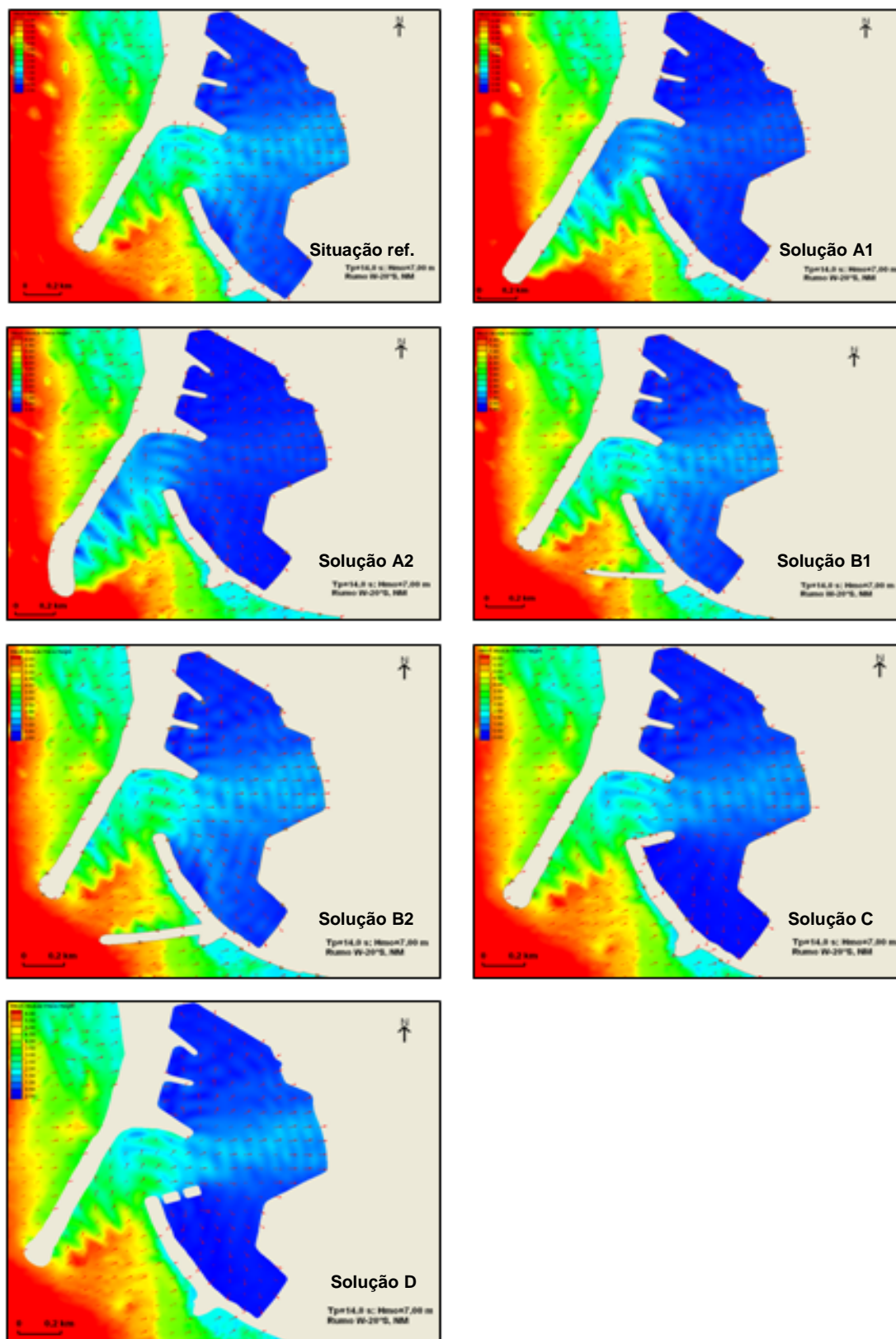


Figura 7 – Porto da Póvoa de Varzim. Diagramas de altura de onda. Da esquerda para a direita, de cima para baixo: situação de referência; solução A1; solução A2; solução B1; solução B2; solução C; solução D.



7. Conclusão

Os resultados obtidos vão de encontro às queixas que têm sido apresentadas pela administração do porto da Póvoa de Varzim relativamente à falta de tranquilidade sentida na zona da marina.

Estudaram-se quatro soluções de abrigo pelo exterior e duas pelo interior, para tentar diminuir a agitação que atinge o interior do porto, analisando diversos cenários, para ondas geradas pelo vento com períodos de pico de 14,0s e 18,0s e com diferentes rumos ao largo (W, W-20°S e NW). As alturas de onda significativa consideradas ao largo foram de 5,00m e 7,00m para um $T_p = 14,0s$, e 6,00 m e 10,00m para um $T_p = 18,0s$. Note-se que quanto maior for a altura de onda ao largo, para um mesmo período de pico, maior é a agitação que atinge o interior do porto. Os resultados obtidos demonstram isso mesmo.

Das várias soluções analisadas concluiu-se que a solução A2, onde se analisou o prolongamento do molhe norte em cerca de 180 m, e a solução C, que consiste na construção de um quebra-mar com 100 m, ligado à cabeça do molhe sul, são as duas soluções que melhor satisfazem as condições pretendidas para que a marina possa ser utilizada sem restrições. Os resultados obtidos permitiram concluir ainda que:

- as ondas que vêm de NW raramente causam problemas de agitação no interior do porto;
- as ondas vindas de W-20°S são as que mais se propagam para o interior do porto, causando grandes problemas de agitação marítima em quase todo o abrigo portuário;
- o efeito do atrito de fundo não influencia os resultados;
- os níveis de maré abordados influenciam os resultados de forma diferente;
- é difícil abrigar o porto de uma maneira eficaz para as ondas com $H_{m0}=10,00$ m, que têm um período de retorno de 100 anos, mas para ondas com $H_{m0}=5,00$ m com um período de retorno de 10 anos, as duas soluções escolhidas garantem as condições de tranquilidade na marina;
- a orientação das ondas ajuda na estabilização das embarcações, quanto mais para o interior da marina se vai;
- nenhuma das soluções propostas piora as condições de agitação na zona do norte do porto.

O trabalho desenvolvido permite, assim, abrir caminho para que se façam estudos mais aprofundados e com um grau de precisão mais elevado, tendo como ponto de partida uma ideia das soluções possíveis que garantem as condições de tranquilidade na marina da Póvoa de Varzim.

No futuro é necessário efectuar um estudo económico para que se escolha a solução definitiva que possibilita o funcionamento do porto na sua máxima capacidade, uma vez que as melhores soluções do ponto de vista técnico nem sempre são as mais viáveis economicamente.



8. Bibliografia

CEHIDRO, 2004, Centro de Estudos de Hidrossistemas, APDL. Agitação à entrada do Porto de Leixões. Modelação matemática.

Chow, V. T., 1981. *Open-Channel Hydraulics*, Internacional Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., pp. 89 – 123.

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

Jones, N. L., and Richards, D. R., 1992, Mesh Generation for Estuarine Flow Models, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **118**, 599-614

PIANC Reports – “Commission for Sport and Pleasure Navigation”. *Review of Selected Standarts for Floating Dock Designs*. Supplement to Bulletin 93, January 1997

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/328px-Mapa_de_Portugal_-_Distritos_plain2.png