

Figura 5: Aspecto da série temporal da elevação da superfície livre medida no período de 13 a 23 de Janeiro de 2009.

A fim de analisar as condições de agitação ao largo nesse período, apresentam-se na Figura 6 os valores da altura de onda máxima e significativa, de período máximo e médio, e da direcção da agitação disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico na sua página web (<http://www.hidrografico.pt/>) correspondentes à bóia ondógrafo colocada ao largo de Sines, a 83 m de profundidade e a uma latitude de 41°19'00"N e uma longitude de 8°59'0"W. Embora seja difícil definir exactamente os valores correspondentes aos dias 18 e 19 de Janeiro (zona a verde nas figuras), o período em análise não se destaca por alterações significativas na agitação marítima. No entanto, seria desejável possuir os dados de agitação na bóia de Sines para o período em análise para tirar conclusões mais detalhadas e definitivas.

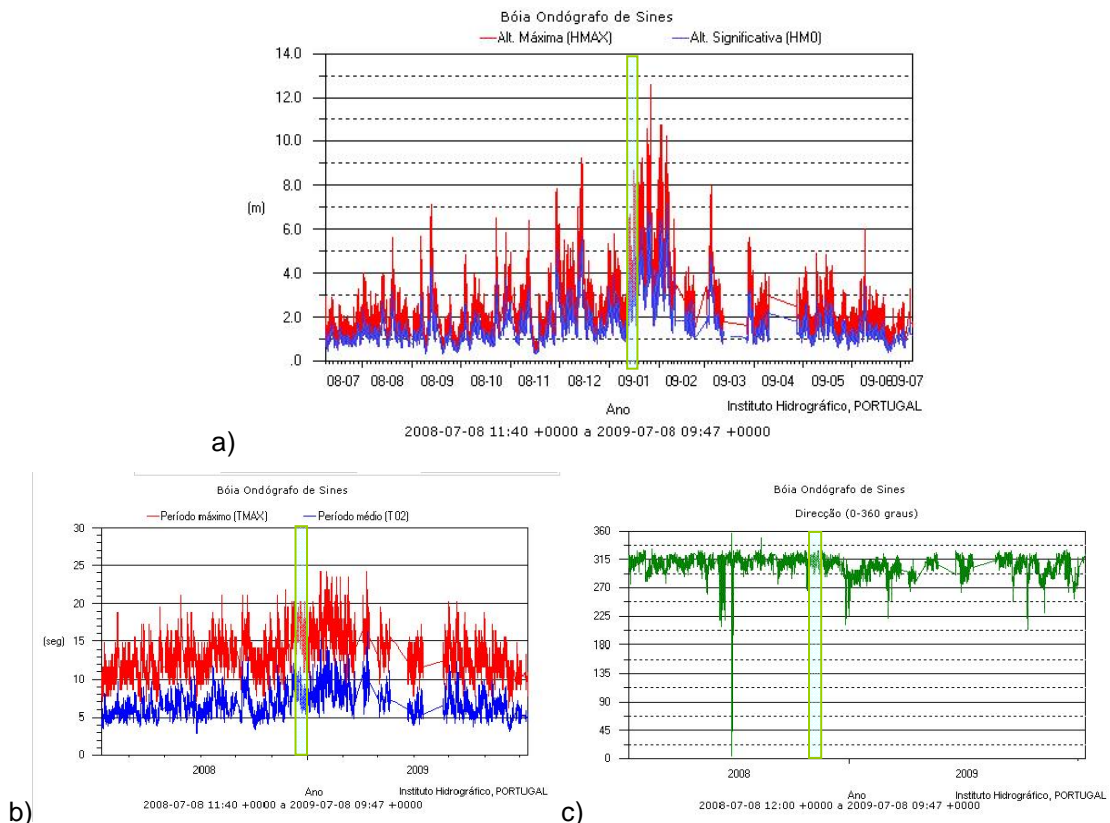


Figura 6: Valores temporais de: a) altura de onda máxima e significativa; Período máximo e período médio; c) Direcção, no período de 15-07-2008 a 15-07-2009.



3 Estudo numérico com o modelo DREAMS

Nas próximas secções, apresentam-se os cálculos de ressonância efectuados com o modelo DREAMS para determinação das curvas de resposta em vários pontos no interior da bacia de adução de Sines. Tal permite avaliar quais os períodos naturais de ressonância desta bacia e se esses períodos correspondem aos observados nos registos efectuados no interior da bacia.

3.1 O modelo DREAMS

DREAMS é um modelo matemático para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras, Fortes (1993). O modelo pode ser aplicado no estudo, quer da penetração da agitação marítima de período curto num porto, quer da ressonância de uma marina excitada por ondas de longo período nela incidentes. É baseado na equação bidimensional de declive suave, Berkhoff (1972) e Smith e Sprinks (1975), dada por:

$$\nabla \cdot (c_g \nabla \eta) + k^2 c_g \eta = 0 \quad (1)$$

em que η é a elevação da superfície livre, função das coordenadas (x,y) ; $c = \omega / k$, a velocidade de fase ou celeridade da onda; $c_g = d\omega / dk$, a velocidade de grupo; e ω a frequência angular da onda que se relaciona com k , o número de onda, através da relação de dispersão $\omega^2 = gk \tanh(kh)$.

Esta equação tem em conta os efeitos combinados da refração, difracção e reflexão e descreve a propagação de ondas monocromáticas de pequena amplitude em fundos de declive suave como os que ocorrem vulgarmente em portos, baías e restantes zonas costeiras.

Admite-se que o declive é suave quando a variação do fundo, ∇h , num comprimento de onda, l , é pequena em relação à profundidade relativa (kh) , isto é, $\nabla h / (kh) \ll 1$, sendo h a profundidade do fundo. Nestas condições, e segundo a dedução da equação de declive suave por Smith e Sprinks (1975), os termos de segunda ordem proporcionais ao quadrado do declive do fundo $(\nabla h)^2$ e à curvatura do fundo $\nabla^2 h$ são considerados pequenos quando comparados com termos envolvendo as derivadas do potencial de velocidade. Por isso, são desprezados.

Booij (1983) comparou resultados de um modelo de elementos finitos bidimensional, baseado na equação de declive suave, com resultados de um modelo de elementos finitos tridimensional, baseado na equação de Laplace e nas condições de fronteira de fundo e de superfície livre linearizadas. Este modelo tridimensional efectua a propagação linear de ondas em fundos com qualquer declive (isto é, não admite a hipótese de declive suave). Esta comparação foi efectuada em termos do coeficiente de reflexão para o caso de ondas monocromáticas propagando-se sobre fundos de diferentes inclinações. Booij (1983) verificou que os resultados obtidos com os dois modelos eram da mesma ordem de grandeza e que a reflexão do fundo só se torna importante para declives muito acentuados (superiores a 1/3).

Este autor concluiu ainda que a equação de declive suave pode ser aplicada em zonas de declive até 1:3, o que permite a sua utilização na generalidade dos domínios costeiros.

Há, no entanto, uma importante limitação que restringe o campo de aplicação da equação de declive suave e que resulta de esta ter sido deduzida com base na teoria linear. A equação de declive suave só é válida para ondas de pequena amplitude e números de Ursell pequenos, isto é, $U_r \ll 1$. De qualquer forma, na generalidade das zonas portuárias ou abrigadas, é válida a sua aplicação, podendo os seus resultados servir como condições de fronteira e iniciais para modelos baseados em formulações não-lineares que se aplicam a zonas mais restritas.

O método numérico utilizado para a resolução da equação de declive suave é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Dado o facto do modelo não apresentar qualquer limitação



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

quanto ao ângulo de incidência da onda na entrada do domínio de cálculo, o mesmo domínio computacional pode ser utilizado para uma larga gama de direcções de onda incidente.

As condições de fronteira implementadas no modelo são as condições de radiação, que permitem a saída de perturbações geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito, as condições de geração e radiação combinadas, como as relativas a fronteiras abertas e que permitem a entrada da agitação incidente e a saída das perturbações geradas no domínio e as condições de reflexão (total ou parcial), referentes aos contornos sólidos da zona em estudo (praias, falésias, molhes, entre outros).

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 (em estudos de ressonância portuária) e direcções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais na superfície livre e as cristas das ondas (linhas de igual fase) constituem resultados opcionais.

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

As principais limitações do modelo são o facto de, por ser linear, não ter em conta efeitos não-lineares, tais como a interacção de ondas e correntes, a interacção de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda, a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas e o efeito da dispersão por amplitude da onda. O modelo também não tem em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo e os galgamentos sobre estruturas. Finalmente, como já foi mencionado, a sua aplicação está condicionada a fundos de declive suave, até 1:3.

3.2 Condições de aplicação do modelo DREAMS

O modelo DREAMS foi aplicado na análise da ressonância no interior da bacia de adução da central termoeléctrica de Sines (ver Figura 7). Para tal, efectuaram-se os seguintes procedimentos:

1. Definição das condições de agitação;
2. Definição do domínio de cálculo e sua discretização por uma malha de elementos finitos com o gerador automático GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006);
3. Propagação de ondas regulares na zona em estudo:
 - Definição das características das ondas regulares incidentes;
 - Cálculos com o modelo DREAMS;
 - Determinação das curvas de resposta em vários pontos do domínio de cálculo.

3.2.1 Condições de agitação

As ondas regulares utilizadas nos cálculos de propagação com o modelo DREAMS, com um nível de maré de +2.0 m (nível médio) e +4.0 m (nível de preia-mar de águas vivas), em relação ao Zero Hidrográfico (Z.H.), correspondem a:

- Períodos de 20 s a 640 s com intervalos de 20 s;
- Direcções de S (90°) e SSW (112.5°).

3.2.2 Batimetria, domínio de cálculo e malhas computacionais

A batimetria da zona de estudo, utilizada na aplicação do modelo matemático, foi obtida com base em elementos fornecidos pela EDP, nomeadamente a batimetria de 1999, e outras existentes previamente no LNEC (Figura 7).

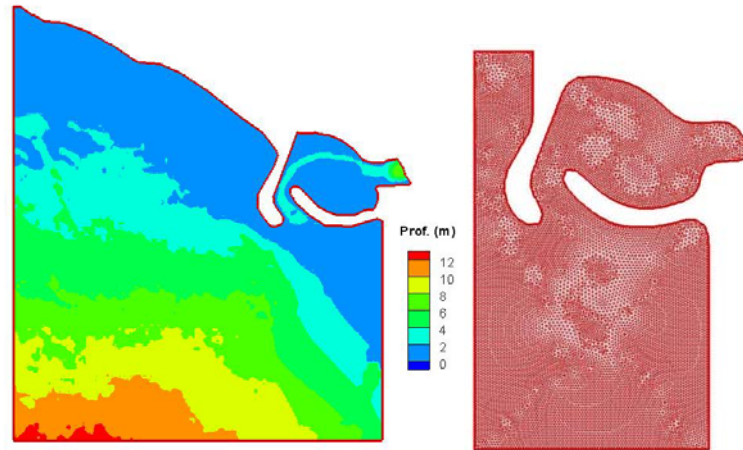


Figura 7: Batimetria, domínio de cálculo e malha de elementos finitos do modelo DREAMS.

O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 172 329 nós e 342 599 elementos, Figura 7. A densidade de nós da malha foi definida de modo a garantir mais de 12 pontos por comprimento de onda em todo o domínio para um período de 20s. Note-se que quanto maior é o período maior é o comprimento de onda e consequentemente o número de pontos por comprimento de onda será sempre superior a 55, nos casos testados neste trabalho.

O coeficiente de reflexão adoptado em todos os troços constituintes das fronteiras do domínio foi igual a 1.0, uma vez que, para esta gama de períodos elevados, as fronteiras se comportam como superfícies completamente reflectoras.

3.3 Apresentação e discussão de resultados

Para as condições de agitação apresentadas na secção 3.2.1, efectuaram-se os cálculos com o modelo DREAMS. Os resultados do modelo DREAMS consistiram nos diagramas do coeficiente de amplificação em todo o domínio de cálculo e nos respectivos valores em 7 pontos, Figura 8, no interior da bacia portuária.

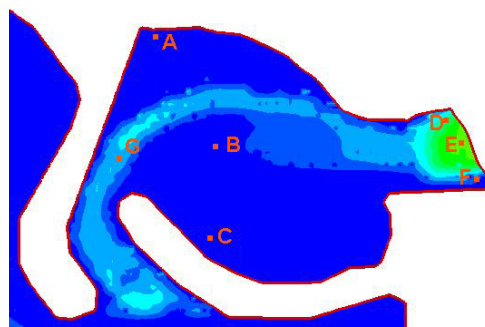


Figura 8: Pontos para a definição das curvas de resposta

Com base nos resultados de DREAMS nesses 7 pontos, foram construídas as curvas de resposta (que traduzem a variação do coeficiente de amplificação com o período de oscilação), para as várias direcções de onda incidente e níveis de maré. Da Figura 9 à Figura 12 apresentam-se as curvas de resposta da bacia para os diferentes pontos, correspondentes ao nível médio (+2.0 m Z.H.) e de preia-mar de águas vivas (+4.0 m Z.H.).

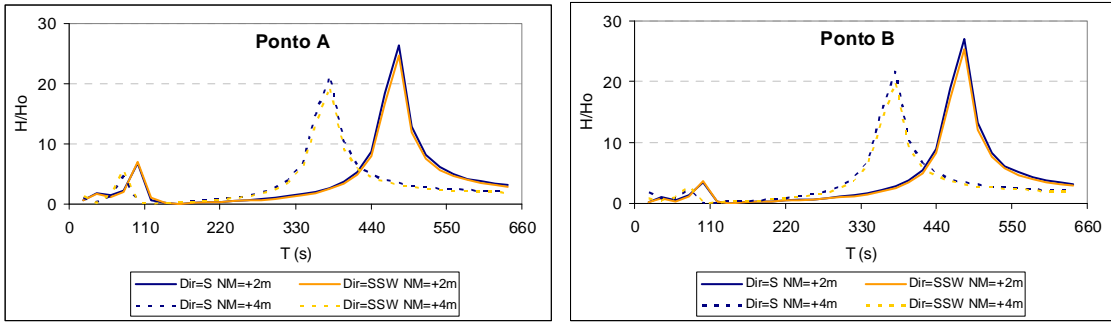


Figura 9: Pontos A e B. Curvas de resposta.

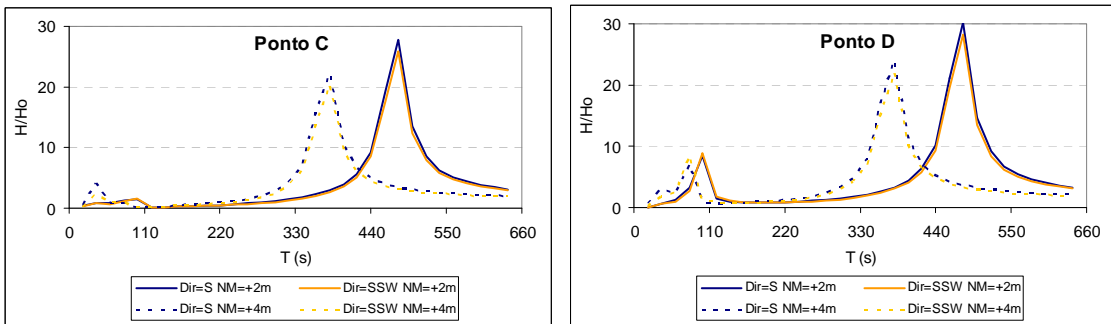


Figura 10: Pontos C e D. Curvas de resposta.

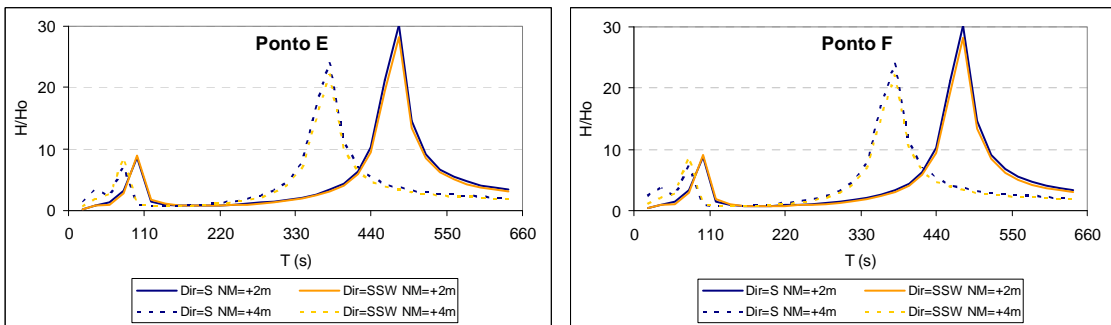


Figura 11: Pontos E e F. Curvas de resposta.

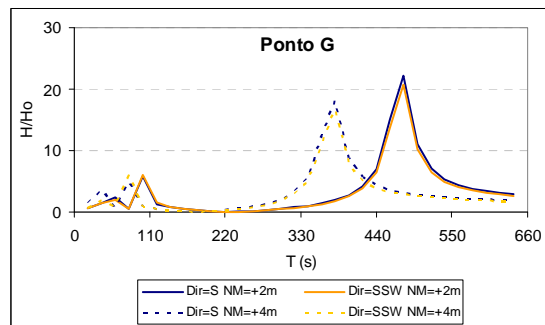


Figura 12: Ponto G. Curvas de resposta.

Tabela 1: Períodos de ressonância e factores de amplificação nos pontos.

Direcção	NM	Ponto	T ressonância	Factor de amplificação	T ressonância	Factor de amplificação
S	+2.0m	A	100	6.8	480	26.3
		B	100	3.5	480	27.0
		C	100	1.5	480	27.7
		D	100	8.6	480	30.2
		E	100	8.7	480	30.2
		F	100	8.9	480	30.2
		G	100	5.8	480	22.2
	+4.0m	A	80	7.0	380	21.3
		B	80	3.6	380	21.8
		C	40	1.6	380	22.2
		D	80	8.9	380	24.1
		E	80	9.0	380	24.1
		F	80	9.1	380	24.2
		G	80	5.0	380	18.2
SSW	+2.0m	A	100	4.8	480	24.6
		B	100	2.2	480	25.3
		C	100	4.0	480	25.9
		D	100	7.0	480	28.2
		E	100	7.1	480	28.2
		F	100	7.1	480	28.3
		G	100	6.0	480	20.7
	+4.0m	A	80	5.7	380	19.5
		B	80	2.9	380	20.0
		C	40	2.1	380	20.4
		D	80	8.5	380	22.1
		E	80	8.8	380	22.1
		F	80	8.9	380	22.1
		G	80	6.0	380	16.7

Apresenta-se, como exemplo, da Figura 13 à Figura 16, os diagramas do coeficiente de amplificação para as direcções S e SSW e períodos de 80 s, 100 s, 380 s e 480 s, respectivamente.

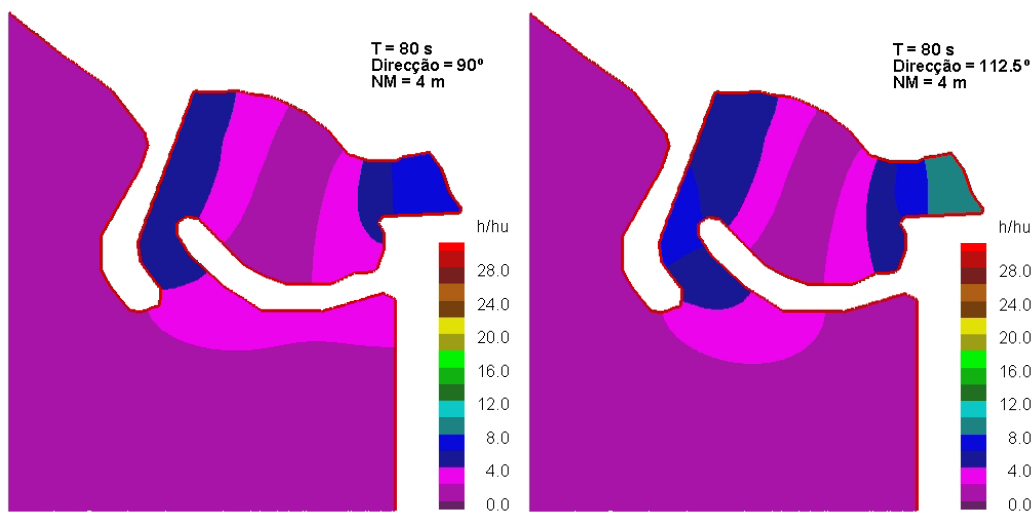


Figura 13: Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de S (90°) e SSW (112.5°) e período de 80 s.

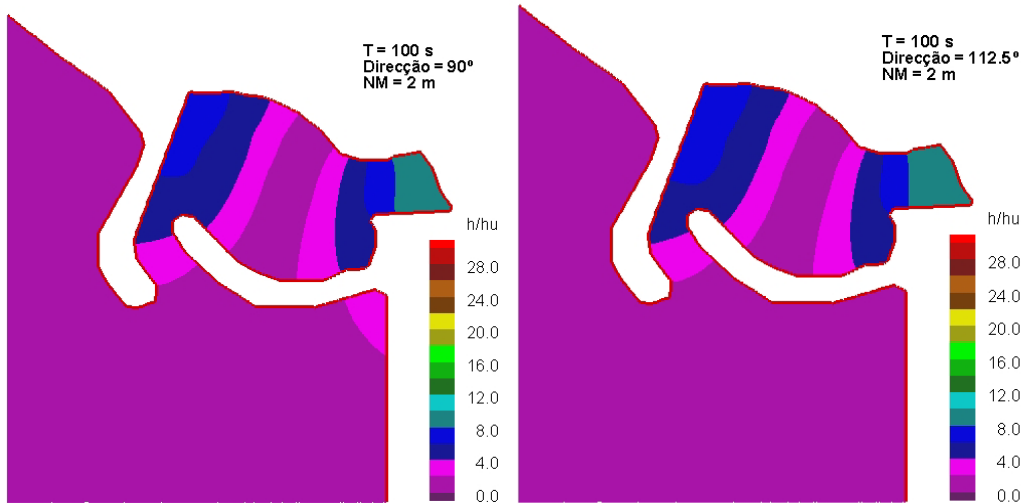


Figura 14: Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de S (90°) e SSW (112.5°) e período de 100 s.

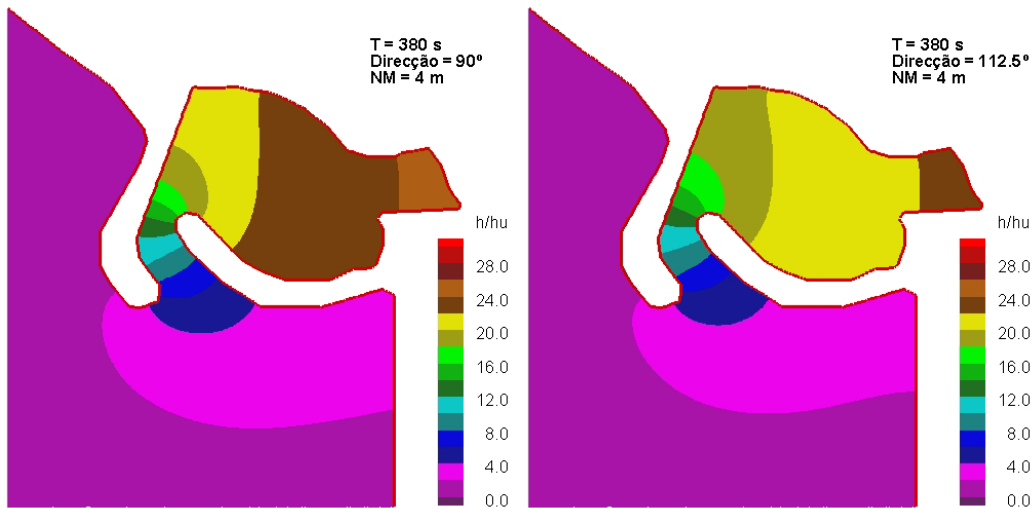


Figura 15. Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de S (90°) e SSW (112.5°) e período de 380 s.

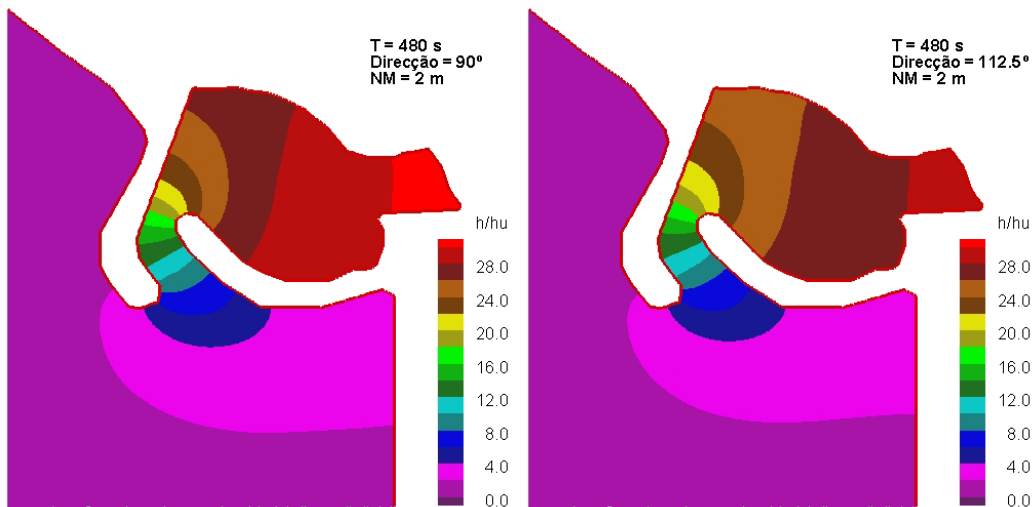


Figura 16: Diagrama do coeficiente de amplificação para o rumo local de S (90°) e SSW (112.5°) e período de 480 s.



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

Estes oito casos representam as condições que originam ressonância na bacia e ilustram duas situações diferentes de ressonância no interior da bacia de adução. Para os períodos de onda de 100 s e 80 s, para os níveis de maré de +2.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), respectivamente, a bacia oscila em torno de um nodo localizado sensivelmente a meio da bacia. Existem dois ventres que ocorrem nas zonas dos pontos D, E, F e G. No caso dos períodos de onda de 480 s e 360 s, para os níveis de maré de +2.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), respectivamente, 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 dos pontos D, E e F.

Em mais detalhe, verificou-se dos resultados apresentados que, no interior da bacia podem existir amplificações significativas da agitação de longo período nela incidente para qualquer das direcções de propagação e níveis de maré testados, ou seja, verificou-se:

- uma situação de ressonância para o período de onda de 100 s e nível de maré +2.0 (ZH) e período de onda de 80 s e nível de maré +4.0 (ZH), correspondendo-lhe uma oscilação da bacia bi-ventral, ou seja, em torno de um nodo localizado sensivelmente a meio do porto;
- uma situação de ressonância para o período de onda de 480 s e nível de maré +2.0 (ZH) e período de onda de 380 s e nível de maré +4.0 (ZH), correspondendo-lhe uma oscilação da bacia uni-ventral, do tipo *pumping-mode*, ou seja, a bacia oscila em torno de um nodo localizado na zona de entrada da bacia;
- Não se notam diferenças significativas do valor de amplificação com a direcção de onda incidente embora os valores para ondas de Sul sejam um pouco superiores;
- A amplificação da altura de onda para o nível médio de +2.0 m (ZH) é superior à observada para o nível de maré de preia-mar de +4.0 (ZH) e ocorre para períodos ligeiramente superiores.
- É nos pontos D, E e F que se atingem os maiores valores da amplificação da onda, precisamente os pontos localizados junto à tomada de água.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta comunicação, descreveu-se o estudo de ressonância realizado na bacia de adução da central termoeléctrica de Sines. Este estudo consistiu na aplicação do modelo DREAMS, de forma sistemática, para condições de agitação incidente correspondentes a períodos de onda entre 20 s a 640 s, direcções de onda de S e SSW. Os resultados do modelo, que consistem nos coeficientes de amplificação permitiram calcular as curvas de resposta (variação do coeficiente de amplificação com o período de oscilação) em vários pontos no interior do domínio de cálculo.

As principais conclusões foram que ocorreram situações de ressonância no interior da bacia para os períodos de onda de 100 s e 80 s, para os níveis de maré de +2.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), respectivamente, e de 480 s e 380 s, para os níveis de maré de +2.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), respectivamente. Para os períodos de 100 s e 80 s, a oscilação é do tipo bi-ventral enquanto que para os períodos 480 s e 380 s é do tipo uni-ventral, respectivamente.

Por outro lado, a análise espectral das medições efectuadas *in situ* de níveis de água no período de 18 a 19 de Janeiro, que corresponde um evento onde se verificou agitação excessiva no interior da bacia, conduziu a dois períodos de ressonância 100 s e 530 s.

Comparando os resultados numéricos com os registos disponíveis verifica-se que os períodos ressonantes são da mesma ordem de grandeza embora exista uma ligeira diferença no período maior (480 s obtido numericamente e 530 s medido no local). Esta diferença pode ser explicada pelo facto do modelo DREAMS ser um modelo linear que não tem em conta fenómenos não lineares que podem contribuir para a alteração dos períodos das ondas desde o ponto de geração (na fronteira do domínio de cálculo) até aos pontos de medição (neste caso, os pontos D, E e F) ou pelo facto de só se terem testado apenas dois níveis de maré, já que este tem uma influência significativa no valor do período ressonante, verificando-se um



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

aumento do período ressonante com a descida do nível de maré. Pode, no entanto, afirmar-se que a ocorrência de alturas significativas de onda no interior da bacia são o resultado de fenómenos ressonantes para os períodos em torno de 100 s e de 500 s.

A realização de cálculos numéricos para outros níveis de maré constitui trabalho futuro. Além disso, embora os dados medidos sejam já um excelente início de trabalho, seria interessante verificar, com dados de outros eventos ressonantes que voltem a acontecer na bacia, se existe alguma relação entre as condições de agitação ao largo, medidas na bóia de Sines, os níveis de maré e os eventos de ressonância verificados no interior da bacia. Assim, seria possível verificar se há alguma característica comum nas condições exteriores que possa ser a causa da excitação dos modos ressonantes no interior da bacia e prever este tipo de fenómenos

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a EDP a autorização para a publicação dos resultados desta comunicação.

Referências

- Berkhoff, J.C.W. (1972) - Computation of combined refraction-diffraction. Proc.13rd International Conference in Coastal Engineering, Vancouver (Canada), Vol. 2, pp. 471-490.
- Booij, N. (1983) – A note on the accuracy of the mild-slope equation. Coastal Eng. 7, pp. 191–203.
- Capitão, R. (2002) – “Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima”, Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.)
- 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.
- Pinheiro, L.V.; Fernandes, J.L.M.; Fortes, C.J.E.M. (2006) – “Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias”. *I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, Lisboa, 8 e 9 de Junho.
- Smith, R.; Sprinks, T. (1975) - Scattering of surface waves by a conic island. J. Fluid Mechanics, Vol. 72, Part 2, pp. 373-384.