

Estudo de Ressonância no Terminal XXI do Porto de Sines

C.J.E.M. Fortes (1), M. G. Neves (1), L. Pinheiro (1) e R. Capitão (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101. 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt.

Resumo: Neste artigo, descreve-se o estudo de ressonância efetuado no Terminal XXI do Porto de Sines, com base na análise de dados de campo medidos *in situ*, durante um conjunto representativo de episódios considerados ressonantes, e na determinação dos períodos de oscilação própria da bacia portuária, utilizando o modelo numérico DREAMS (Fortes, 1993). Os dados de campo foram obtidos por um marégrafo, do Instituto Hidrográfico, localizado num ponto do interior da bacia portuária, a partir de Março de 2011. Os resultados do modelo são comparados com os dados medidos no interior da bacia portuária em períodos de ocorrência de fenómenos de ressonância.

Palavras chave: Algarve, costa rochosa, plataforma litoral, ondas, correntes.

1. INTRODUÇÃO

O porto de Sines está situado na costa ocidental Sul de Portugal Continental. A bacia do Terminal de Contentores, ou Terminal XXI, situa-se na zona mais a Sul do porto e é protegida da agitação marítima incidente pelo chamado quebra-mar leste, Fig. 1.



Fig. 1. Porto de Sines. Configuração do Terminal XXI, em fevereiro de 2011. Desenho fornecido pela APS.

Desde fevereiro de 2011, no âmbito do Plano de Expansão do Terminal XXI do porto de Sines, o quebra-mar leste e o cais acostável estão a ser objeto de ampliações de modo a aumentar as atuais capacidades do Terminal XXI. Em fevereiro de 2011, a bacia portuária era abrigada por um quebra-mar com cerca de 1100 m de comprimento. Junto à cabeça do quebra-mar, as profundidades variam entre 18 e 20 m, aproximadamente, enquanto no interior da bacia variam entre 1 e 21 m, aproximadamente. O cais acostável do Terminal XXI tem 380 m de comprimento.

De fevereiro a dezembro de 2011, procedeu-se à realização de um conjunto de obras no cais de acostagem que vista a prolongá-lo para 730 m. Estas obras podem ser visualizadas na Fig. 2.

Ora, esta bacia portuária tem registado alguns episódios de ressonância, tendo sido observados valores excessivos de alturas de onda no seu interior, ao mesmo tempo que se verificava que a agitação marítima no exterior da mesma nem sempre era significativa. Este tipo de fenómenos acarreta

problemas de operacionalidade, nomeadamente relacionados com a interrupção das operações portuárias e a quebra de amarras.



Fig. 2. Porto de Sines. Configuração do Terminal XXI, em Dezembro de 2011. Desenho fornecido pela APS.

Para estudar a resposta desta bacia à ação das ondas longas e melhorar o conhecimento do seu funcionamento ressonante, procedeu-se à análise de dados de campo durante um conjunto representativo de episódios ressonantes e à determinação dos períodos de oscilação própria da bacia, utilizando o modelo numérico DREAMS (Fortes, 1993). Os dados de campo foram obtidos a partir de março de 2011 por um marégrafo do Instituto Hidrográfico localizado num ponto do interior da bacia portuária. O modelo numérico foi aplicado para a situação a que corresponderá um cais acostável de 730 m. Os resultados do modelo são comparados com os dados medidos no interior da bacia portuária em períodos de ocorrência de fenómenos de ressonância.

Nas próximas secções descrevem-se as medições *in situ* e as análises efetuadas para as situações em que ocorreram fenómenos de ressonância no porto. Seguidamente, descreve-se a aplicação do modelo DREAMS para caracterizar as condições de ressonância da bacia. Finalmente, efetua-se uma análise comparativa entre resultados numéricos e medições nas datas em que se verificaram problemas no interior da bacia do Terminal XXI, terminando-se esta comunicação com uma secção de notas finais.

2. MEDIÇÕES IN SITU E ANÁLISE

A partir de março de 2011 foram, no âmbito deste estudo, efetuadas medições da elevação da superfície livre do mar com um marégrafo do Instituto Hidrográfico localizado num ponto do interior da bacia portuária. Também, entre outubro e novembro de 2011 foram registadas na boia-ondógrafo ao largo de Sines diversas situações de temporal. Finalmente, foi efetuado um registo das ocorrências de problemas com navios no interior do terminal, pela *Port Sines Authority* (PSA), a partir de fevereiro de 2011.

No período de 14 de maio a 10 de novembro de 2011 verificou-se que apenas ocorreram problemas nos navios que atracaram no Terminal XXI a partir do início de outubro de 2011. Em todo o mês de outubro e no início do mês de novembro de 2011, ocorreram problemas, tendo sido registada a ocorrência de cabos partidos nos dias:

- o 30 e 31 de outubro;
- o 3, 4, 19 e 20 de novembro.

Ocorreram ainda condições de “navio a mexer devido a ondulação” nos dias:

- o 23, 24, 25, 27, 28, 29 e 30 de outubro.

Por outro lado, entre outubro e novembro de 2011, registou-se, na boia de Sines, a ocorrência de temporais ($H_s > 5$ m) nos dias:

- o 24 e 27 de outubro;
- o 3, 4 e 22 de novembro.

Verificou-se que, embora as direções de agitação dos temporais se situem dentro da gama W-NW, para a qual foi referido haver problemas ressonantes no interior da bacia, apenas o temporal de 3 e 4 de novembro coincidiu com dias em que ocorreram “registo de cabos partidos” e os de 24 e 27 de outubro coincidiram com os dias em que ocorreu “navio a mexer devido a ondulação”.

Nos dias em que houve cabos partidos verificou-se também que, embora as direções associadas aos temporais registados se situem dentro da gama W-NW, as alturas de onda significativas e os períodos de pico variaram bastante de caso para caso, apesar de os períodos de pico máximos serem elevados em praticamente todos os casos. Quanto aos níveis de maré, também se verificaram condições bastante diversas. No entanto, é de destacar que nos dias 3, 4, 19 e 20 de novembro as diferenças de nível entre baixa-mar e preia-mar eram muito reduzidas (inferiores a 1.9 m), enquanto nos restantes dias variaram entre 2.3 m e 3.3 m.

Para as datas em que ocorreram problemas no Terminal XXI, para as quais se dispõe de dados do marégrafo colocado no seu interior, calcularam-se as respetivas condições de agitação (ondas de longo período) e as medidas na bóia ondógrafo direcional (ondas de curto período). Na Fig. 3 apresentam-se os valores da altura de onda significativa de curto e longo período, H_{s_ol} e H_{s_oc} , para estas datas.

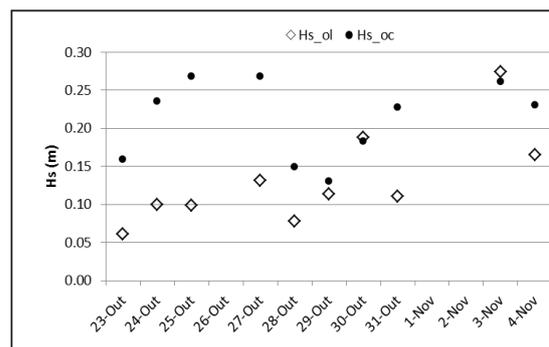


Fig. 3 Porto de Sines. Alturas de onda significativas de ondas longas, H_{s_ol} , e curtas, H_{s_oc} .

Verificou-se que, para os casos analisados, as alturas significativas das ondas longas eram relevantes (entre 0.06 m e a 0.27 m) e os maiores valores registados nem sempre coincidiam com temporais. Também não é visível a existência de uma relação clara entre alturas de onda significativas de ondas longas e curtas.

O período de pico associado às ondas longas encontra-se em duas gamas distintas de frequências (150 s e 159 s e 617 s e 726 s). Analisando as condições em dias sem registo de problemas operativos no Terminal XXI, verificou-se que as alturas de onda significativa relativas à onda curta e longa eram bastante inferiores às registadas nos dias em que houve problemas. No entanto, os valores dos períodos de pico de onda curta e longa estão dentro da gama de valores registados nesses dias de ocorrência de problemas, embora a gama de períodos com energia significativa seja bastante mais reduzida. Verifica-se, portanto, que o mesmo período de pico das ondas pode gerar, ou não, problemas de operação no Terminal XXI consoante a respetiva altura onda significativa.

3. APLICAÇÃO DO MODELO DREAMS

3.1. Introdução

Nesta secção, apresentam-se os cálculos de ressonância efetuados para determinação das curvas de resposta em vários pontos no interior da bacia portuária do Terminal XXI de Sines, para a situação considerada atual em que existe um prolongamento do quebra-mar, com inflexão de 25°, em 400 m e do cais de acostagem para 2 postos de acostagem, com 730 m, Fig. 4. Tal permite avaliar quais os períodos naturais de ressonância desta bacia e se esses períodos correspondem aos observados nos registos efetuados no interior da bacia.

O modelo 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 bacia portuária excitada por ondas de longo período nela

incidentes. É baseado na equação bidimensional de declive suave.

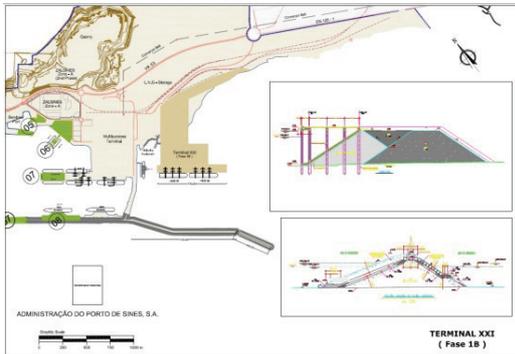


Fig. 4 Porto de Sines. Configuração do Terminal XXI, em Dezembro de 2011. Desenho fornecido pela APS.

3.2. Condições de aplicação

O modelo DREAMS foi aplicado na análise da ressonância no interior da bacia portuária (ver Fig. 4). Para tal, efetuaram-se os seguintes procedimentos:

- Definição do domínio de cálculo e sua discretização por uma malha de elementos finitos com o gerador automático GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006);
- Definição dos coeficientes de reflexão ao longo da fronteira do domínio em estudo;
- Cálculos numéricos de propagação de ondas para as condições definidas;
- Determinação das curvas de resposta em vários pontos do domínio de cálculo.

As ondas regulares utilizadas nos cálculos correspondem a:

- Períodos de 20 s a 600 s com intervalos de 5 s;
- Direções de SW (225°), WSW (247.5°) e W (270°).

Os períodos escolhidos englobam a gama das ondas de longo período para as quais se verificaram episódios de ressonância. Foram testados os níveis de maré de +2.0 m (nível médio) e +4.5 m (Z.H.) - nível de preia-mar de águas vivas.

A batimetria da zona de estudo, utilizada na aplicação do modelo matemático, foi obtida com base em elementos fornecidos pela Administração do Porto de Sines (APS), e outras existentes previamente no LNEC, Fig. 5. O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 171 489 nós e 340 688 elementos. A densidade de nós da malha foi definida de modo a garantir mais de 10 pontos por comprimento de onda em todo o domínio para um período de 8 s.

O coeficiente de reflexão adotado 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 refletoras.

3.3. Apresentação e discussão de resultados

Analisaram-se os diagramas dos coeficientes de amplificação e dos vetores de velocidade em todo o domínio de cálculo e em 32 pontos escolhidos no interior da bacia portuária, Fig. 5.

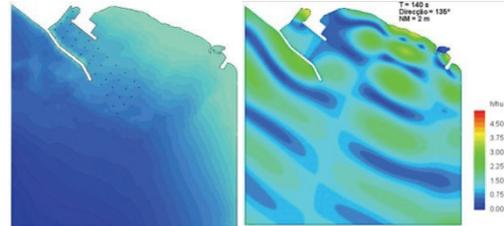


Fig. 5 Domínio de cálculo e pontos de cálculo

Com base nos resultados de DREAMS nesses 32 pontos, foram construídas as curvas de resposta (que traduzem a variação do coeficiente de amplificação com o período de oscilação), para as várias direções de onda incidente e níveis de maré. A título indicativo, na Fig. 6 apresentam-se as curvas de resposta da bacia no ponto 33 (ponto onde se localiza o marégrafo), correspondentes aos níveis desde +2.0m (Z.H.), para as diferentes direcções de onda.

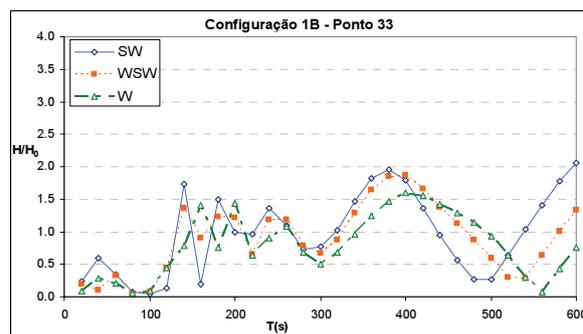


Fig. 6. Ponto 33. Curvas de resposta.

Os casos estudados representam as condições que originam ressonância no interior da bacia portuária. Verifica-se que, em geral, ocorrem situações de ressonância em períodos nas gamas de 120 s a 240 s, de 340 s a 420 s, para o nível de maré de +2.0 m (Z.H.) e de 60 a 200 s e 320 s a 380 s para o nível de maré +4.5 m (Z.H.) e da ordem dos 600 s para quaisquer dos níveis de maré. Embora os valores de amplificação não sejam superiores a 4.0, as velocidades são significativas, especialmente na zona do cais de acostagem. O comportamento das configurações testadas não varia significativamente com a direção da onda. A zona mais interior da bacia portuária do Terminal XXI, onde se encontra o marégrafo, é a que apresenta maiores amplificações ressonantes.

4. ANALISE COMPARATIVA ENTRE DADOS IN SITU E MODELO NUMÉRICO

Nesta secção, com base nos dados de campo medidos *in situ* durante dois eventos ressonantes ocorridos em 31 de Outubro e 3 de Novembro de

2011 na bacia portuária, foi possível determinar a gama de períodos ressonantes da bacia e compará-la com os períodos de oscilação própria da bacia obtidos com o modelo numérico DREAMS.

A análise espectral das medições de campo durante os eventos onde se verificou agitação excessiva no interior da bacia conduziu a duas gamas de períodos de ressonância (54 s a 72 s e 150 s a 180 s), sendo mais energética a que corresponde aos maiores períodos. Verificou-se ainda que estes eventos ocorreram quando os níveis de preia-mar (PM) e baixa-mar (BM) diferiam pouco e variavam entre, aproximadamente, +3.0 m (Z.H.) a +1.0 m (Z.H.). Para as condições de agitação na bóia ondógrafo de Sines que se verificavam aquando dessas condições de ressonância, foram efetuados cálculos com o modelo DREAMS para períodos de 2 em 2 segundos compreendidos entre 54 s a 72 s e 150 s a 180 s. O nível de maré considerado foi de +2.0 m (Z.H.). Na Fig. 7 apresentam-se a título de exemplo dois dos diagramas de coeficientes de amplificação obtidos.

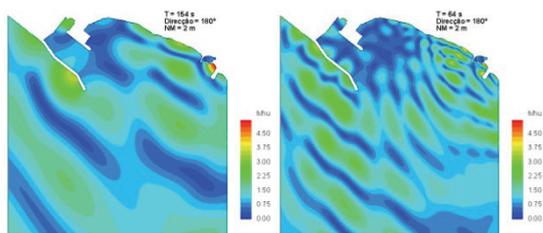


Fig. 7 Amplificação da onda para $T=64$ s e 154 s.

Na Fig. 8 comparam-se os valores dos períodos de ressonância medidos durante os eventos ressonantes analisados, com os valores obtidos numericamente com o modelo DREAMS (ponto 33), para o nível de maré de +2.0 m (Z.H.).

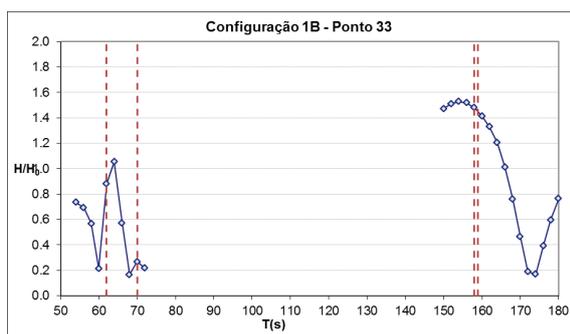


Fig. 8 Coeficientes de amplificação no ponto 33.

Na Fig. 8 as linhas a tracejado indicam as ocorrências de cabos partidos nos navios nos dias analisados (efetuado pela PSA, a partir de fevereiro de 2011) e verifica-se que coincidem na generalidade aos períodos de ressonância dados pelo modelo numérico, o que permite concluir que o modelo está a reproduzir adequadamente o fenómeno. Nota-se inclusive que o modelo conduz a maiores valores de amplificação para os maiores períodos como verificado nos valores medidos.

5. NOTAS FINAIS

O trabalho apresentado estabelece, para já, uma metodologia para a identificação das características de ressonância no interior da bacia. Pretende-se ainda analisar dados de outros eventos ressonantes que aconteçam na bacia de forma a confirmar as conclusões que aqui se apresentam. Além disso tenciona-se analisar as condições de agitação ao largo medidas na bóia de Sines e os níveis de maré medidos no marégrafo do porto de Sines de forma a verificar se existe algum padrão constante na relação entre as condições ao largo (níveis de maré e agitação) e os eventos de ressonância verificados no interior da bacia que permitisse inferir sobre a fonte de excitação dos seus modos ressonantes. Com esta análise julga-se poder obter informação relevante que permita prever a ocorrência deste tipo de fenómenos e, consequentemente, mitigar os seus efeitos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Administração do Porto de Sines (APS), à Port Sines Authority (PSA) e à Conduril a autorização para a publicação dos resultados desta comunicação.

REFERÊNCIAS

- Fortes, C.J.E.M. (1993). *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos*. Msc. 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”, in *Anais da I CNMNMFT, Lisboa (Portugal)*, 8 - 9 Jun.
- Smith, R.; Sprinks, T. (1975). “Scattering of surface waves by a conic island”. *Journal Fluid Mechanics*, 72, Part 2, pp. 373-384.
- Okihiro, M., R.T. Guza e R.J. Seymour (1992). “Bound infragravity waves”. *Journal of Geophys. Res.*, 97, No. C7, pp. 11453-11469.
- Vis, F.C., A. Mol, M.A.M. Rita e C. Deelen (1985). “Long waves and harbour design”, in *Anais da Int. Conf. on Hid. and Num. Modelling of Ports and Harbours*, pp. 249-255.