

ESTUDO DE RESSONÂNCIA DO PORTO DE SINES

Maria da Graça Neves^(a), Miguel A. Losada^(b), Iñigo J. Losada^(c)

^(a) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1799 Lisboa Codex, Portugal.

^(b) E.T.S.I.C.C.P. , Universidad de Granada, Campus La Cartuja, Granada, 18071, Espanha.

^(c) Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros, s/n, 39005, Santander, Espanha.

SUMÁRIO

O porto de Sines tem apresentado diversos problemas em resultado da acção das ondas de longo período. Para estudar a resposta do porto a este tipo de acção, procedeu-se á determinação dos períodos de oscilação própria da bacia portuária, utilizando um modelo numérico que resolve a equação de "Mild-slope". Os resultados obtidos mostram que o problema de tranquilidade do porto de Sines circunscreve-se a períodos de calma local, durante os quais o porto pode estar exposto à acção de ondas de longo período provenientes de tempestades distantes que ocorram no Atlântico.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da influência das ondas de longo (períodos entre 30 e 300 seg) na actividade de um porto tem aumentado nos últimos anos e diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objectivo de compreender este fenómeno e prever a sua influência, Bowers (1977), Vis *et al.* (1985), Okihiro (1992). As ondas de longo período são frequentemente responsáveis pela ressonância de um porto, por perturbações na actividade portuária e pela quebra de amarrações.

O porto de Sines, assim como diversos portos ao longo da costa portuguesa, tem apresentado diversos problemas em resultado da acção das ondas de longo período, que são resolvidos habitualmente com a retirada dos navios dos postos de acostagem para o mar aberto, com todas as limitações económicas de tais procedimentos. Para definir melhor a posição e orientação dos postos de acostagem assim como melhorar as estimativas dos tempos mortos dos postos de acostagem, é importante estabelecer o clima de ondas de longo período na bacia portuária.

O estabelecimento do clima de ondas ao longo da costa portuguesa, quer de ondas de vento quer de ondas de longo período, foi objecto de estudo no âmbito do projecto NATO PO-WAVES entre 1990 e 1994. Estabelecer uma primeira aproximação do clima de ondas de longo período na entrada de um porto e determinar a correlação entre os movimentos horizontais dos navios amarrados e a acção combinada das ondas de curto e longo período foi um dos grandes objectivos deste projecto. Para tal, foram colocados em operação diversos sensores na área do porto de Sines. No entanto, para analisar correctamente os dados fornecidos por estes sensores, assim como estudar a acção das ondas sobre os navios, é necessário conhecer a resposta do porto a acção das ondas de longo período.

O objectivo deste trabalho é o estudo, em modelo numérico, da resposta do porto de Sines a acção das ondas de longo período de forma a permitir conhecer o funcionamento ressonante do porto. O modelo utilizado resolve a equação de "Mild-slope", com base em elementos finitos e foi desenvolvido na Universidade de Cantábria (GIOC UC, 1990).

O estudo encontra-se organizado em duas partes: caracterização da zona de interesse e estudo da resposta do porto de Sines à acção das ondas de longo período. A primeira parte consta de uma breve descrição do porto de Sines e da caracterização do clima marítimo nas proximidades de Sines e a segunda parte consta de uma descrição do modelo numérico

utilizado e os resultados obtidos para o caso do porto de Sines. Finalmente, apresenta-se uma síntese das conclusões do estudo.

2. CLIMA MARÍTIMO EM SINES

O porto de Sines entrou em funcionamento em 1978 e é um porto aberto ao mar, com fundos em rocha natural, não sujeitos a assoreamento, bastante amplo e que, por ser de águas profundas, permite a acostagem de navios de grande porte (Fig. 1). A bacia do porto, onde se localizam os diversos postos de acostagem do Terminal Petrolífero e Petroquímico, é protegida por um quebra-mar (molhe Oeste), com uma extensão de cerca de 2.200m, cuja orientação Norte-Sul dá cobertura às ondulações mais frequentes, que são as provenientes do quadrante NO. O terminal *multi-purpose* encontra-se protegido por um quebra-mar (molhe Este), com a orientação NO-SE, que protege a bacia interior da ondulação proveniente do quadrante SO e estando ainda sob a protecção do molhe Oeste em relação à do quadrante NO. O terminal de Carga Geral é protegido por um quebra-mar com orientação SE-NO. O porto de pesca e o porto de recreio encontram-se integrados numa mesma bacia e são protegidos por dois quebra-mares.

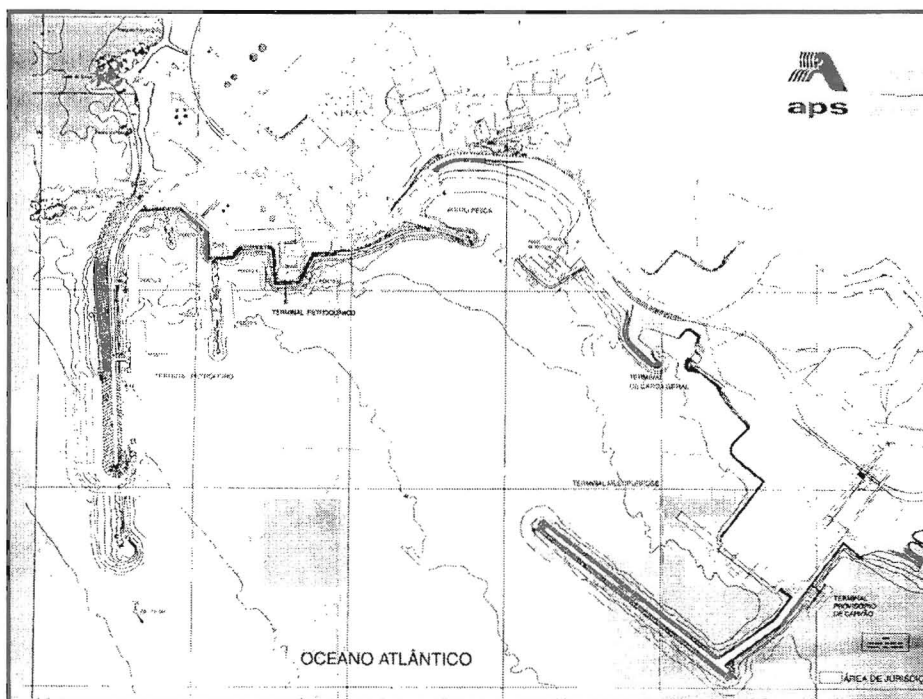


Figura 1 - Porto de Sines

A agitação incidente mais frequente na zona do porto de Sines provem de NO e os ventos dominantes provêm dos quadrantes N-NO e NO. A distribuição de alturas de onda, períodos e direcções da agitação incidente na zona de Sines foi obtida como resultado de estudos no âmbito do projecto NATO PO-WAVES (rel. 6/94A). Para a agitação proveniente de NO (Neves, 1995), devido à localização do molhe Oeste, a bacia está protegida. No entanto, o molhe Oeste não fornece protecção à ondulação proveniente de SO, embora ofereça protecção parcial ao terminal Petrolífero. No entanto, devido às grandes dimensões dos navios atracados em Sines (exceptuando-se os atracados ou fundeados nos portos de recreio e de pesca), as ondas de curto período não afectam as condições de tranquilidade do porto, salvo em casos muito excepcionais de incidência.

Foram efectuadas várias medições no porto de Sines com vista à caracterização do clima de ondas longas. Antes da construção do molhe leste, durante o período de 5 de Maio de 1977 a 28 de Abril de 1978, esteve em funcionamento em Sines um marégrafo instalado no posto de acostagem 3 do molhe Oeste. Da análise dos dados recolhidos, obteve-se que o período das ondas de longo período observadas varia entre 3 e 25 min, sendo o período mais frequente entre 4 e 4 min 30 seg. Quanto às alturas de onda, observaram-se valores entre 2 a 40 cm, sendo os valores mais frequentes de 2 a 5 cm.

Baseado em dados dos portos de Sines e de Leixões, de modelos físicos e considerações teóricas, Vis et al. (1986) estabeleceram uma primeira aproximação do clima de ondas de longo período que incidem no porto de Sines. Das conclusões deste estudo se destaca que, em condições de clima médio anual, as ondas de longo período que chegam ao porto de Sines são essencialmente compostas por ondas livres com uma altura significativa de 4 cm.

De Out. de 92 a Jul. de 93, no âmbito do projecto NATO PO-WAVES e para as condições actuais de geometria do porto (Fig. 1), foram fundeados em Sines dois sensores direccionais de pressão (um na entrada do porto, S6, e outro a sul deste, na praia de S. Torpes, duas bóias-ondógrafo direccionais e uma não direccional. Foram ainda colocados dentro do porto três sensores não direccionais de pressão mas apenas de um deles existem dados disponíveis (posto 4/5). Por problemas associados ao sistema de medição, não foram realizados registos durante a ocorrência de tempestades. Da análise destes dados (NATO PO-WAVES, 6/94), obtem-se que o período médio das ondas de longo período observadas varia entre 43 seg e 8 min, sendo o período mais frequente da ordem do minuto. Quanto às alturas de onda, observaram-se valores entre 1 a 80 cm, sendo os valores mais frequentes de 3 cm. Com base neste conjunto de dados, que tão pouco incluem registos durante a ocorrência de temporais (Neves, 1995) concluiu-se que as ondas de longo período que ocorrem em Sines são essencialmente contituidas por ondas livres, confirmando-se os resultados de Vis (1986).

O problema de tranquilidade do porto de Sines circunscreve-se, pois, a períodos de calma local, durante os quais o porto pode estar exposto à acção de tempestades distantes que ocorram no Atlântico.

3. RESPOSTA DO PORTO DE SINES À ACÇÃO DAS ONDAS DE LONGO PERÍODO

O fenómeno de ressonância gera problemas no funcionamento do porto, ainda que visualmente não sejam tão facilmente identificados como a agitação de ondas de curto período. Os efeitos ressonantes manifestam-se como ondas estacionárias com ventres, a que estão associados os máximos movimentos verticais, e nodos, ou zonas de oscilação vertical nula, a que estão associados os máximos movimentos horizontais. Os movimentos horizontais a que estão sujeitos os navios que se encontram atracados ou fundeados nas zonas nodais são impedidos em parte pelo sistema de amarras. Para o caso de navios amarrados, quando as ondas estacionárias têm periodicidades próximas do período natural do sistema navio-amarração, o efeito ressonante gerado pode fazer rebentar os cabos das amarrações pondo em risco de colisão com as estruturas portuárias ou com outros navios situados nas proximidades. Os movimentos verticais, embora não sejam normalmente muito rápidos, pela sua amplitude podem igualmente dificultar os trabalhos portuários. Para o caso dos navios de grande porte que demandam em Sines, Vis (1986) refere que o período natural dos movimentos horizontais dos navios amarrados está compreendido entre 30 e 200s.

Quando a oscilação da massa de água contida numa bacia portuária coincide com o período de oscilação próprio da mesma, ocorre ressonância. Para a determinação dos períodos próprios de oscilação da bacia portuária de Sines utilizou-se o modelo MSP que se descreve no ponto 3.1. Os resultados obtidos são apresentados no ponto 3.2.

3.1 O modelo numérico MSP

O modelo numérico MSP é um modelo de propagação completa da onda (refracção-difracção) por teoria Linear (GIÖC UC,1990), que resolve a equação completa de "Mild-Slope" (inclinações suaves), por um método híbrido de elementos finitos. Este método foi desenvolvido originalmente por Behrendt (1985) e é capaz de resolver a equação de Helmholtz com fundo

variável. O efeito da absorção parcial de estruturas na região em estudo está também contemplado. No entanto, não se considerou o efeito do atrito do fundo. Ao anular o termo de fricção, está-se a retirar a influência amortecedora do ambiente, que existe sempre na natureza, obtendo-se amplificações ressonantes maiores das que ocorrem na realidade. Assim, o valor do coeficiente de amplificação de um pico ressonante obtido por aplicação deste modelo dá uma ideia do maior ou menor carácter livre da oscilação e não o valor expectável da amplificação num determinado ponto.

O movimento é considerado irrotacional, permitindo, assim, estudar o fenómeno de propagação por meio de uma função potencial. Considera-se também que a batimetria da zona de análise é de inclinação suave, razão pela qual se pode descrever o fenómeno por meio de uma equação bidimensional, integrada em profundidade entre o fundo e a superfície livre, conhecida como equação de refração-difracção ou "Mild-Slope equation". Esta equação é uma equação elíptica e para a sua resolução são necessárias condições de contorno ao longo de todo o domínio de integração. Estas condições podem ser: reflexão total ou parcial em contornos fixos; onda incidente conhecida ou condição de radiação em contornos abertos. A condição de contorno é exacta para incidência normal. No entanto, para os casos de incidência oblíqua, aparecem reflexões indesejáveis, próprias do modelo numérico. Para reduzir este efeito deve-se ter em conta, ao definir a absorção dos contornos, a direcção com que a onda atingirá esse contorno, corrigindo o coeficiente de absorção.

O modelo MSP permite obter planos de agitação no interior do porto, assim como a propagação da onda larga no interior da bacia. Com a sua aplicação podem-se estabelecer os períodos de oscilação natural da bacia do porto, realizando um varrimento de períodos de onda de longo período incidente, obtendo-se, como resultado, os coeficientes de amplificação do movimento em determinados pontos escolhidos.

3.2 Resultados

Para avaliar os períodos próprios da bacia portuária do porto de Sines, utilizou-se a batimetria apresentada na figura 2, baseada na carta nº 84 à escala 1:75.000. Consideraram-se contornos totalmente reflectores, já que, sendo muito baixa a declividade das ondas de longo período, elas sofrerão reflexão quase total ao incidirem sobre as estruturas portuárias, mesmo quando estas são muito rugosas ou de inclinação suave, como é o caso das praias.

Efectuou-se um varrimento de períodos desde 50 seg até um limite de onda de longo período máxima de 500 seg, com incrementos de 5 seg e registaram-se os resultados dos coeficientes de amplificação do movimento em diversos pontos da bacia susceptíveis de ressonância, assim como nos postos de acostagem. Na fig. 3 apresenta-se a localização dos pontos onde se registaram as condições de ressonância nas simulações efectuadas.

Efectuaram-se simulações em duas situações de maré: em baixa-mar e em preia-mar. Na fig. 4 apresentam-se os resultados das simulações para os pontos escolhidos em condições de baixa-mar e preia-mar. Em ordenadas apresenta-se o coeficiente de amplificação do movimento para cada período e em absissas o período simulado, em segundos. Os picos observados correspondem a uma amplificação ressonante do movimento.

Dois parâmetros devem ser tidos em conta ao analisar os resultados obtidos: a magnitude do pico ressonante e a largura de banda desse pico. Teóricamente, o resultado de uma ressonância livre é a amplificação do movimento até que os efeitos de atrito equilibrem o sistema. Dado que no modelo se anulou o termo de fricção, um pico ressonante puro deveria produzir coeficientes de amplificação muito elevados. Assim, o valor do coeficiente de amplificação de um pico ressonante dá uma ideia do maior ou menor carácter livre da oscilação. Também, por se ter simulado com intervalos de 5 segundos, pode ocorrer que os períodos simulados não correspondam ao período de pico ressonante, no entanto este comportamento ressonante seria reflectido nos períodos mais próximos. A largura da banda dos picos ressonantes permite ver a sensibilidade da bacia a determinado período ressonante. Bandas muito estreitas, especialmente em portos bastante abertos, como é o caso do porto de Sines, não são especialmente importantes, dado que pequenas variações de período excitante fazem desaparecer o efeito ressonante. No entanto, períodos de grande largura de banda,

coincidentes com possíveis períodos de ocorrência de ondas de longo período, são fortes indicadores da possibilidade de ocorrência de ressonância.

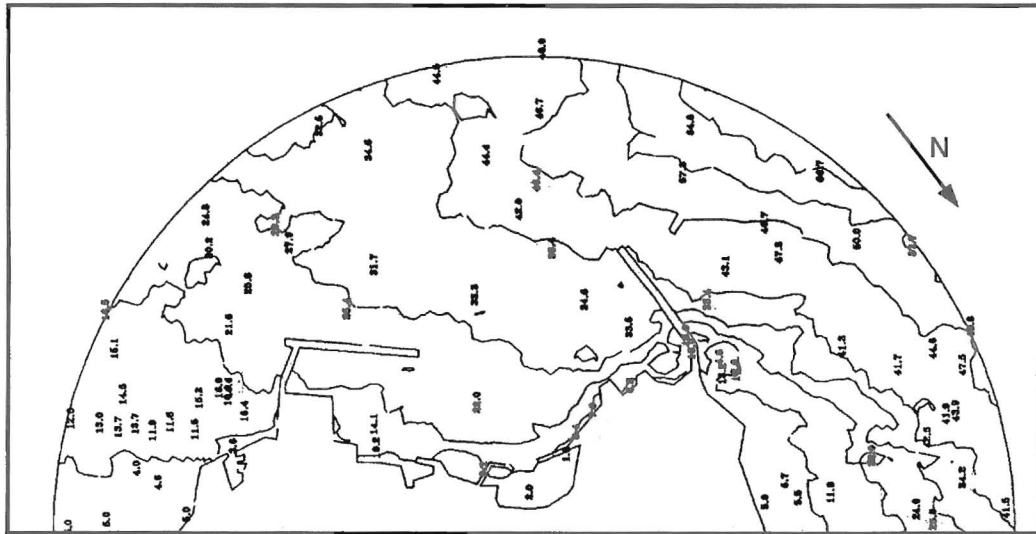


Figura 2 - Porto de Sines: batimetria da zona de estudo

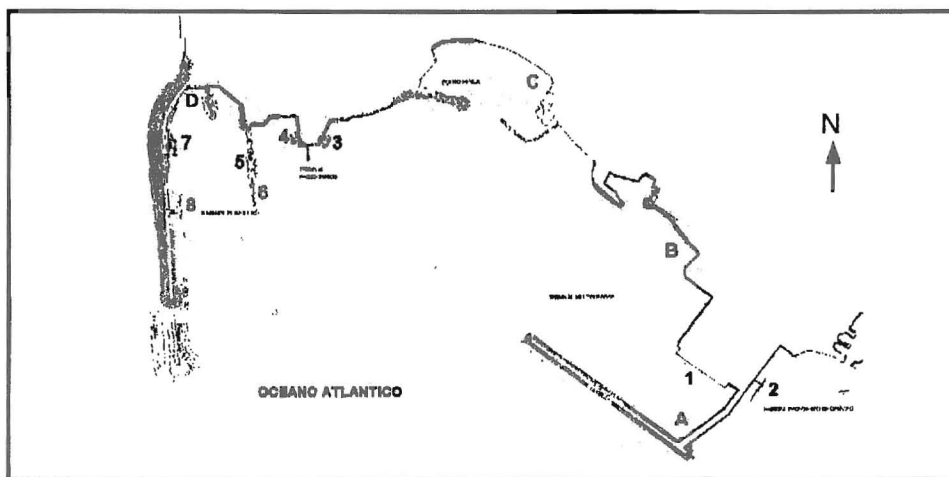


Figura 3 - Localização dos pontos de estudo do fenómeno ressonante, no interior do porto

Da análise dos resultados obtidos podem observar-se picos de ressonância de banda estreita, que por ser o porto de Sines bastante aberto e portanto pouco selectivo, não serão períodos importantes. No entanto, os resultados mostram os seguintes picos de ressonância de banda larga, cuja magnitude indica uma grande sensibilidade a estes períodos:

baixa-mar: períodos entre 240 e 260 seg e entre 315 e 350 seg

preia-mar: períodos entre 280 e 320 seg.

Estes períodos são, conforme se referiu em 2, períodos susceptíveis de ocorrer no porto de Sines. Os picos de ressonância obtidos em preia-mar ocorrem para períodos inferiores aos de baixa-mar, o que é expectável já que o período próprio é inversamente proporcional à profundidade. Apresentam-se nas figs 5 a 7 os resultados do factor de amplificação em todo o domínio, simulado para estes três casos.

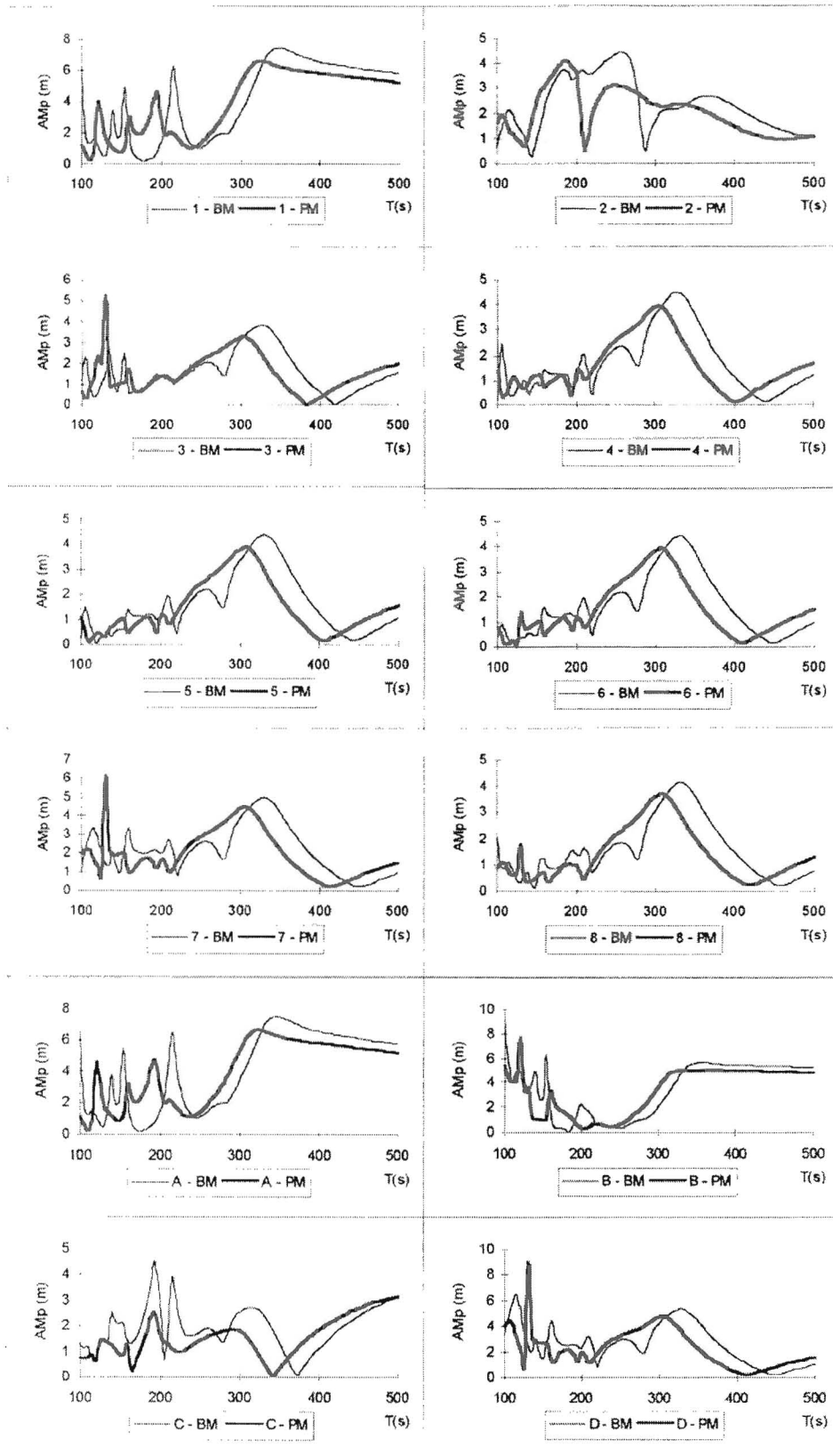


Figura 4 – Factores de amplificação em diferentes pontos no interior do porto de Sines

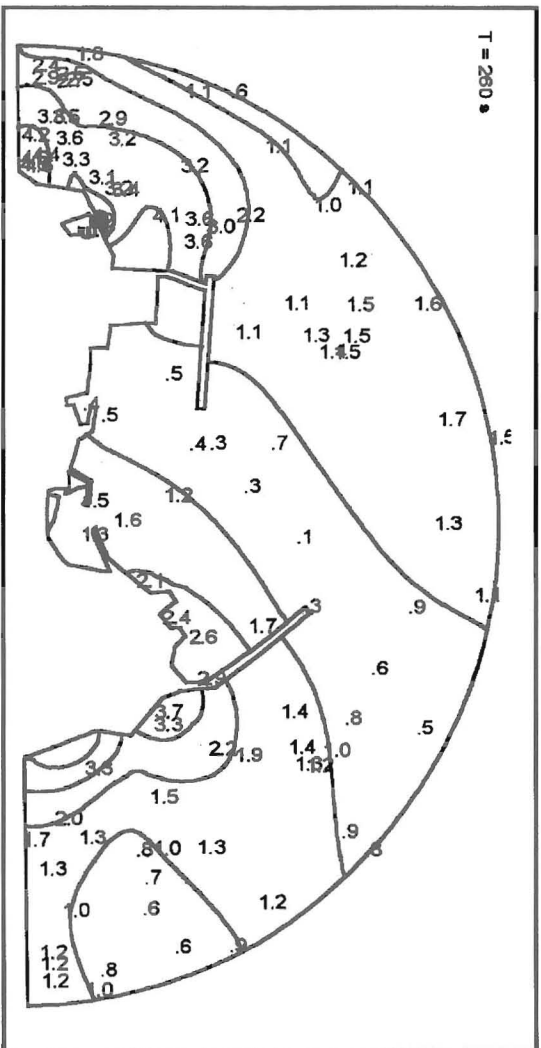


Figura 5 - Factor de amplificação para T=260 seg (BM)

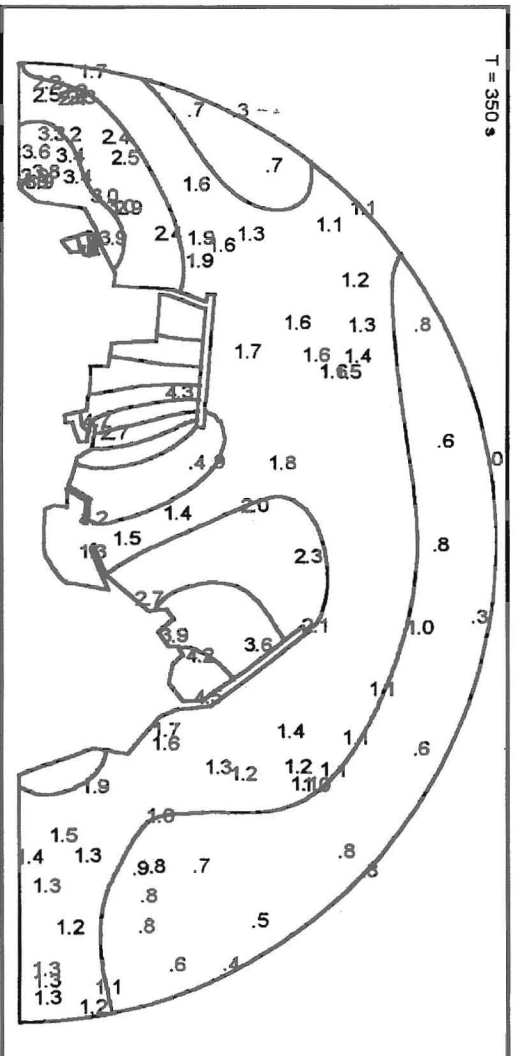


Figura 6 - Factor de amplificação para T=350 seg (BM)

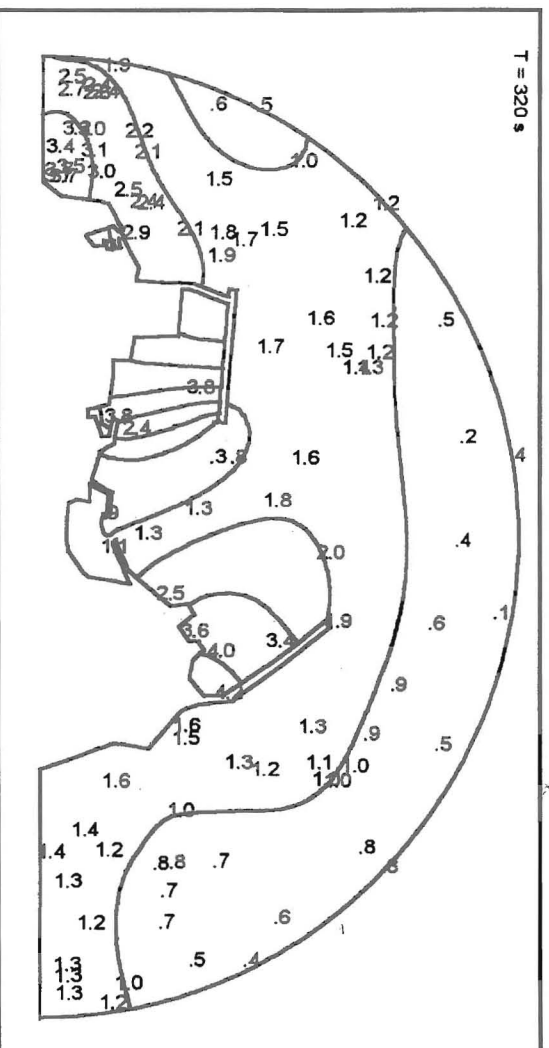


Figura 7 - Factor de amplificação para T=320 seg (PM)

Da análise das figuras pode observar-se uma mesma resposta ressonante do porto para as diferentes condições de simulação, com um modo ressonante unimodal, apresentando um nodo no centro da bacia e ventres no interior da bacia do terminal *multipurpose*, no interior da bacia do terminal petroleiro e no interior da bacia dos portos de pesca e de recreio.

Os postos de acostagem dos terminais petroleiros e petroquímicos encontram-se localizados numa zona intermédia entre o nodo e os ventres para este modo ressonante. Estas zonas poderão ter movimentos horizontais importantes o que, por imposições do sistema de descarga, não são permitidos. No terminal *multipurpose*, o sistema de carga e descarga permite maiores movimentos dos navios atracados. Assim, embora este terminal esteja também situado entre um nodo e um ventre para o modo ressonante e, conseqüentemente, possa ter movimentos horizontais de certa importância, estes não terão conseqüências tão gravosas para o funcionamento do porto. A dimensão dos barcos atracados ou fundeados no porto de pesca é bastante mais pequena e os esforços induzidos ao sistema de amarração pelos movimentos que se possam gerar devido a ressonância são menos importantes. No caso do porto desportivo, pela dimensão dos navios, desenho e sistemas de amarração (com 'fingers'), não se prevê que as acções das ondas de longo período possam ocasionar problemas graves de funcionamento.

4. CONCLUSÕES

O porto de Sines tem apresentado diversos problemas em resultado da acção das ondas de longo período, que são resolvidos habitualmente com a retirada dos navios dos postos de acostagem para o mar aberto, com todas as implicações económicas de tais procedimentos. A compreensão do problema de ressonância de um porto levará a uma melhor definição da posição e orientação dos postos de acostagem assim como a melhores estimativas dos seus tempos mortos. Este estudo tem como objectivo descrever o funcionamento do porto de Sines no que respeita à acção das ondas de longo período.

No que respeita a ondas de longo período, apresentaram-se os dados existentes no porto de Sines, analisando-se deste modo as condições que se consideram susceptíveis de ocorrer nesta zona. Com base nestes dados, que correspondem apenas a condições de clima médio anual, ou seja, não incluem temporais, concluiu-se que as ondas de longo período que afectam o porto de Sines são essencialmente compostas por ondas livres com alturas significativas de 4 cm. As ondas observadas têm períodos que variam entre 3 e 25 min., sendo o período mais frequente entre 4 min e 4 min e 30 seg e com alturas de onda mais frequentes de 2 a 5 cm.

Para a análise da resposta do porto de Sines à acção das ondas de longo período, estabelecimento dos períodos de oscilação natural da bacia do porto e dos seus modos de oscilação, aplicou-se o modelo numérico MSP. Este modelo resolve a equação de "Mild-slope" com base em elementos finitos e permite propagar a onda de longo período no interior da bacia e obter planos de agitação nessa zona.

Da análise dos resultados do modelo pode concluir-se que o período próprio de ressonância do porto de Sines é da ordem dos quatro a seis minutos, apresentando um modo ressonante unimodal, com a presença de um nodo no centro da bacia e ventres no interior da bacia do terminal *multipurpose*, no interior da bacia do terminal petroleiro e no interior da bacia dos portos de pesca e de recreio. Estes períodos, como se viu anteriormente, são susceptíveis de ocorrer neste porto, mesmo em condições de clima médio.

O fenómeno de ressonância será especialmente gravoso para o funcionamento do porto nos postos de acostagem dos terminais petroleiros e petroquímicos, já que, por imposições do sistema de descarga, não são permitidos grandes movimentos nos navios aí atracados. Estes postos, para o modo ressonante descrito, encontram-se localizados numa zona intermédia entre o nodo e os ventres, podendo assim ter movimentos horizontais importantes. No terminal *multipurpose*, o sistema de carga e descarga permite maiores movimentos dos navios atracados, e por isso os movimentos gerados devido à ressonância do porto não terão conseqüências tão gravosas para o seu funcionamento. O mesmo ocorre nos portos de pesca e desportivo, já que a dimensão dos barcos aí atracados ou fundeados não é grande e os

esforços induzidos ao sistema de amarração pelos movimentos que se possam gerar devido a ressonância são menos importantes.

BIBLIOGRAFIA

- Bowers, E.C. (1977) - *Harbour resonance due to set-down beneath wave groups*. Proc. 23rd Coast. Engrg. Conf. 832-845.
- Behrendt, L. (1985) - *A finite element model for water wave diffraction including boundary absorption and bottom friction*. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering. Technical University of Denmark.
- G.I.O.C. U.C. (1990) - *Manual del Modelo MSP*. E.T.S.I.C.C.C.Y.P. Universidad de Cantabria. 1190.
- Neves, M.G. (1995) - *Bound Long Waves at Sines*. Relatório final, NATO PO-WAVES 1/95-B, Fevereiro de 1995.
- Okhiro, M., R.T. Guza e R.J. Seymour (1992) - *Bound infragravity waves*. Journal of Geophysical Research. Vol. 97, No. C7, pp. 11453-11469.
- Relatório NATO PO-WAVES 6/94A (1994) - *Final report of Sub-Project A "Wind Wave Climatology of the Portuguese Coast"*. Lisbon, July 1994.
- Vis, F.C., A. Mol, M. Marcos Rita e C. Deelen (1985) - *Long waves and harbour design*. Proc. Int. Conf. on Hid. and Num. Modelling of Ports and Harbours, pp. 249-255.