SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE NAVIOS AMARRADOS EM BACIAS ABRIGADAS

LILIANA PINHEIRO[1*], JOÃO ALFREDO SANTOS[2], CONCEIÇÃO FORTES[3]

RESUMO

Neste artigo descreve-se a ferramenta numérica SWAMS que se baseia nos modelos numéricos DREAMS, BOUSS-WMH e MOORNAV para caracterizar a resposta dum navio amarrado no interior dum porto sujeito à acção da agitação marítima. Os dois primeiros modelos simulam a propagação de ondas lineares e não lineares em zonas abrigadas de profundidade variável, tendo em conta os fenómenos da refracção, difracção, reflexão parcial, dissipação de energia devida ao atrito de fundo e rebentação das ondas. Enquanto o modelo DREAMS é um modelo linear baseado na equação de declive suave, o modelo não linear BOUSS-WMH é baseado nas equações de Boussinesq. O comportamento do navio amarrado é simulado com o pacote numérico MOORNAV que engloba um modelo numérico para resolver, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difração da interacção de corpos flutuantes com ondas e um modelo que converte os resultados daqueles problemas do domínio do tempo para o domínio da frequência e que monta e resolve as equações do movimento do navio amarrado, BAS.Apresentam-se as modificações introduzidas no modelo WAMIT para calcular as forças de difracção com base nas relações apresentadas em Haskind. Tais relações, porque utilizam o potencial de velocidades obtido com o modelo DREAMS ou com o modelo BOUSS-WMH, permitem levar em conta a refracção, difracção ou reflexão que podem ocorrer na propagação das ondas para o interior de uma bacia abrigada. Para além da descrição dos modelos numéricos na ferramenta SWAMS, apresenta-se a forma como os resultados são transferidos entre eles bem como aplicações da mesma para ilustrar as suas capacidades.

PALAVRAS-CHAVE: Agitação marítima. Navio amarrado. Modelos numéricos Portos. SWAMS.

1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima incidente no interior de uma bacia abrigada pode causar movimentos excessivos de um navio no seu posto de acostagem os quais podem levar não só à interrupção das operações de carga e descarga como a colisões com outros navios e/ou infra-estruturas portuárias com consequências económicas significativas.

A acoplagem de modelos numéricos de propagação de ondas com um modelo numérico para o comportamento de navios sujeitos amarrados sujeitos à ação dessas mesmas ondas permite identificar estados de mar potencialmente adversos e planear com segurança as atividades portuárias.

[1] Autor para correspondência: lpinheiro@lnec.pt,Telefone: +351 218 443 756.
[2] Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.
[3] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

No LNEC tem vindo a desenvolver-se uma ferramenta numérica designada por SWAMS que acopla modelos de caracterização da agitação marítima com um modelo de simulação da resposta dum navio amarrado no interior dum porto sujeito à acção da agitação marítima. A grande vantagem duma ferramenta deste tipo é a possibilidade de fornecer as séries temporais dos movimentos do navio, das forças e das extensões nos elementos de amarração a partir das características da agitação marítima ao largo. Esta informação pode ter origem em medições de bóias ou em modelos de previsão, fazendo desta uma ferramenta muito útil, quer para a conceção do arranjo geral portuário, quer para o planeamento de actividades portuárias.

Para a caracterização da agitação marítima, o SWAMS pode recorrer a um modelo linear baseado na equação de declive suave, o modelo DREAMS [1], capaz de simular a propagação de ondas monocromáticas em zonas abrigadas tendo em conta os fenómenos de refração, difração e reflexão ou a um modelo mais complexo, o modelo BOUSS-WMH (*BOUSSinesq Wave Model for Harbours*, [2,3], capaz de uma descrição precisa da evolução de estados de mar reais em zonas abrigadas de profundidade variável, tendo em conta os fenómenos da refracção, difracção, reflexão parcial, interacções não lineares, dissipação de energia devida ao atrito de fundo e rebentação das ondas.

Na simulação do comportamento do navio amarrado, utiliza-se o pacote numérico MOORNAV [4] que recorre aos resultados obtidos no domínio da frequência com o modelo WAMIT [5] nos problemas de radiação e de difração de um corpo flutuante livre para obter as forças hidrodinâmicas necessárias ao modelo BAS [6] que monta e resolve, no domínio do tempo, as equações de movimento do navio amarrado levando em conta a agitação marítima incidente no navio e a geometria e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração.

O modelo WAMIT foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica do *Massachusets Institute of Technology* para avaliar os esforços induzidos pelas ondas em estruturas flutuantes de exploração petrolífera colocadas em mar alto, isto é, em que a agitação incidente no corpo flutuante pode ser considerada a sobreposição de ondas de crista retilínea, cada qual com o seu período e provenientes de várias direções.

Trata-se de uma hipótese que só em condições muito especiais pode ser observada para navios amarrados no interior de uma bacia portuária pois a onda que neles incide terá certamente sido difratada pelas obras de abrigo do porto. Como o modelo WAMIT contempla a existência de vários corpos flutuantes, alguns dos quais podem estar imóveis e ocupando a totalidade da coluna líquida, seria possível utilizar este modelo para resolver a interação das ondas com um corpo flutuante colocado no interior de uma bacia abrigada. Contudo, tal implica a resolução de um sistema de equações de dimensão exagerada. Uma

alternativa possível é a utilização das relações estabelecidas por Haskind [7] envolvendo o potencial do escoamento associado às ondas radiadas pelo navio com o potencial das ondas incidentes na posição em que o navio será colocado e que permitem calcular as forças exercidas pelas ondas no navio imobilizado.

Neste artigo descrevem-se: as componentes do pacote SWAMS, no capítulo 2; a aplicação do pacote SWAMS ao cálculo dos movimentos de um navio amarrado numa condição muito especial, onde o modelo WAMIT pode ser utilizado diretamente, no capítulo 3; no mesmo capítulo apresentam-se ainda os primeiros resultados com os procedimentos baseados nas relações de Haskind já implementados naquele pacote e os resultados obtidos com o teste desses procedimentos. O artigo termina com a apresentação de considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e a desenvolver.

2. FERRAMENTA SWAMS

A ferramenta SWAMS (*Simulation of Wave Action on Moored Ships)* é uma ferramenta integrada para a modelação numérica da propagação de ondas e do comportamento de navios amarrados no interior de portos de apoio à decisão do planeamento de operações portuárias.

É constituída por uma interface gráfica com o utilizador e um conjunto de módulos para a execução de modelos numéricos. A interface com o utilizador permite o armazenamento e manipulação de dados, a execução de modelos numéricos.

Cada modelo corresponde a um módulo ao qual estão associadas as bases de dados que congregam toda a informação dos projectos. Com esta aplicação é possível realizar estudos sem conhecer em detalhe o funcionamento dos modelos numéricos que lhes estão subjacentes, salvaguardando, como é óbvio, um conhecimento mínimo desejável para o bom uso da ferramenta e posterior análise de resultados. Assim esta aplicação permite armazenar e manipular dados de forma fácil, executar os modelos numéricos, obter os resultados e realizar as correspondentes visualizações gráficas de propagação da agitação marítima e de simulação da resposta de navios à agitação marítima em bacias portuárias.

O ambiente escolhido para o desenvolvimento do SWAMS foi o Microsoft Access™ que tem a vantagem de ter integrada a linguagem de programação por objectos e dirigida por eventos *Visual Basic for Applications* (VBA). Uma das vantagens desta linguagem é a possibilidade de utilizar e manusear diferentes aplicações Microsoft Windows.

O conjunto de módulos do SWAMS inclui:

- O módulo SWAN correspondente ao modelo espectral com o mesmo nome, SWAN, Booij et al. [8], que se baseia na equação da conservação da acção da onda e é capaz de modelar a propagação não linear de agitação marítima;
- O módulo DREAMS, Fortes [1], correspondente ao modelo DREAMS que se baseia na equação de declive suave;
- O módulo BOUSS-WMH, que se baseia no modelo não linear de elementos finitos BOUSS-WMH, Pinheiro [2,3], que resolve as equações não lineares de Boussinesq deduzidas por Nwogu [9];
- O módulo MOORNAV, Santos [4] que monta e resolve as equações de movimento do navio amarrado assumindo a linearidade da interação de um corpo flutuante com as ondas, como proposto por Cummins [10].

As bases de dados contidas no SWAMS são as bases de dados em MS Access™, correspondentes aos módulos dos modelos numéricos, que contêm a informação dos projectos criados e ainda diversas pastas onde são armazenados todos os ficheiros criados.

A representação gráfica de dados e resultados no SOPRO é realizada com o programa *Golden Software Surfer*™ (para o módulo SWAN), o programa Tecplot™ (para o módulo DREAMS) e o MS Excel™ (para os módulos WAMIT e BAS) e Autocad (para o módulo WAMIT). Os programas de visualização gráfica, como o *Golden Software Surfer*™, o Tecplot™ e o MS Excel™ Autocad são invocados pela interface através de macros activadas por eventos que automatizam todo o processo de criação de mapas e gráficos.

Nas sub-secções seguintes descrevem-se apenas os módulos referentes aos modelos de propagação de ondas e de resposta navios amarrados no interior de portos utilizados nos casos de estudo apresentados neste artigo.

2.1. Modelo DREAMS

O campo da onda incidente no local onde o navio será colocado é fornecido pelo modelo numérico DREAMS [1]. Trata-se de modelo para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras e que 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 dada por:

$$\nabla.\left(cc_g \nabla\eta\right) + k^2 cc_g \eta = 0 \qquad (1)$$

em que 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 refracção, 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.

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 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/Ho), relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H, e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, Ho, 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.

2.2. Modelo BOUSS-WMH

BOUSS-WMH [2,11] resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu [9], válidas desde águas de profundidade intermédia a águas pouco profundas, e é um modelo indicado para a propagação e deformação de ondas não lineares e dispersivas em zonas de batimetria variável pois permite reproduzir alguns dos processos mais importantes presentes em regiões costeiras de média a baixa profundidade: a difracção, a refracção, a reflexão, o empolamento, a dispersão de energia para as harmónicas.

Para a integração na vertical, foi admitido um perfil de velocidades tipo a uma profundidade pré-definida. O modelo usa o pacote SPRINT [12], para a integração temporal e o método de Galerkin com uma malha não estruturada de elementos finitos para a discretização espacial. As malhas de elementos finitos são geradas com o gerador automático GMALHA, Pinheiro et al. [3], especialmente criado para modelos de propagação de ondas marítimas. Para a geração das ondas (regulares e irregulares) no domínio

encontra-se implementada uma condição de geração no interior do domínio por intermédio de uma função fonte, segundo o procedimento de Wei et al. [13]. Esta condição permite não só a geração das ondas mas também que as ondas reflectidas nas fronteiras físicas do domínio e que se propagam na direcção da fonte, possam ser absorvidas evitando a sua permanência no domínio e consequente adulteração das características das ondas.

Como condições de fronteira, são admitidas condições de reflexão ou de absorção total. A condição de absorção total é conseguida através da colocação de uma zona absorvente ("*sponge layer*"). Para a simulação da interacção das ondas com uma fronteira física (como é o caso de um quebra-mar ou um cais, falésias rochosas, etc.) é imposta uma condição de fronteira de reflexão total. Este modelo foi desenvolvido para aplicações a uma e duas dimensões (em planta), permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (representativa) em cada ponto do domínio de aplicação.

2.3. O pacote numérico MOORNAV

No LNEC, a determinação do movimento do navio amarrado num posto de acostagem sujeito à agitação incidente é realizada utilizando o pacote numérico MOORNAV [4]. Trata-se essencialmente de dois modelos numéricos:

- WAMIT [5] que resolve, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difracção da interacção de um corpo flutuante livre com as ondas nele incidentes;
- BAS [6] que monta e resolve, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado no posto de acostagem levando em conta as séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio, as funções de resposta a impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos de amarração e defensas);

aos quais se juntou um interface entre os dois modelos, uma vez que os resultados fornecidos pelo WAMIT não são exactamente as grandezas necessárias ao funcionamento do modelo BAS e porque é necessário fornecer ao modelo BAS a série temporal das forças exercidas pela agitação marítima incidente no navio, para além de forças devidas a ventos ou a correntes quase estacionárias.

2.3.1. Equações de movimento do navio amarrado

Ponto fundamental no estabelecimento das equações de movimento para um navio amarrado é a modelação das forças exercidas no casco do navio devido a interacção do mesmo com as ondas.

Assumindo de pequena amplitude os movimentos do navio segundo cada um dos seus seis graus de liberdade, pode retirar-se logo a parcela correspondente à variação

quase estática da forma do casco submerso. Surge assim a matriz de restituição hidrostática C_{kj} cujos coeficientes são a força segundo a coordenada k devida a uma variação unitária da posição do navio segundo a coordenada j em água parada.

A mesma hipótese de pequena amplitude dos movimentos do navio leva à linearidade da interacção do casco com as ondas nele incidente o que permite a decomposição daquele problema em dois problemas mais simples, Cummins [10]: o problema de radiação, no qual se determinam as forças que é necessário fazer segundo cada um dos graus de liberdade para o movimento arbitrário do casco em águas de outra forma paradas; e o problema de difracção, no qual se determina a força F_k^d, segundo cada grau de liberdade k, exercida pela agitação incidente no casco do navio imobilizado.

O problema de radiação pode considerar-se a sobreposição de movimentos impulsivos cada um dos quais origina uma elevação da superfície livre que depois se afasta do casco como uma onda. Assim, no cálculo das forças associadas ao problema de radiação tem-se a chamada massa adicionada para frequência infinita, m_{kj}, a força segundo a coordenada k para uma aceleração unitária segundo a coordenada j, e $K_{kj}(\tau)$ a função de resposta a impulso (também chamada de função de atraso) representando a força segundo a coordenada k, τ segundos depois de um movimento de velocidade impulsiva segundo j.

Do exposto, resulta para a Equação (2) de movimento do navio amarrado:

$$\sum_{j=1}^{6}\left[(M_{kj}+m_{kj})\ddot{x}_j(t)+\int_{-\infty}^{t}K_{kj}(t-\tau)\,\dot{x}(\tau)\,d\tau+C_{kj}x_j(t)\right]=F_k^d(t)+F_k^m(t)+F_k^f(t) \qquad (2)$$

em que M_{kj} é a matriz de massa do navio e $F_k^m(t)$ e $F_k^f(t)$ são os valores instantâneos das forças devidas aos cabos de amarração e às defensas. Em rigor, trata-se de um conjunto de seis equações de cuja solução se obtêm as séries temporais dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio e dos esforços nas amarras e nas defensas.

Na equação acima, as matrizes de massa e de restituição hidrostática dependem apenas da geometria do navio e da distribuição de massas no mesmo. As forças devidas às amarras e às defensas podem determinar-se a partir das relações constitutivas destes elementos do sistema de amarração e da variação de comprimento entre as extremidades das mesmas (no caso das defensas tem que se levar em conta a não variação de comprimento associada à ausência de contacto entre o navio e a defensa).

O modelo numérico BAS [6] monta e resolve, no domínio do tempo, estas equações de movimento levando em conta as séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio, as funções de resposta a impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos de amarração e defensas). Utiliza um método θ para discretização das variações temporais naquelas equações resolvendo o sistema de equações algébricas não-lineares resultantes pelo método de Newton-Raphson, sendo a primeira estimativa da velocidade no instante n+1 para aplicação daquele método fornecida pelo método de Adams-Bashforth de 1ª ordem.

2.3.2. O modelo numérico WAMIT

As funções de resposta a impulso, a matriz de massa adicionada para frequência infinita e as forças de excitação devidas às ondas que surgem na Equação (2) dependem da forma do casco e da perturbação causada pela presença do casco imóvel no escoamento associado à propagação da onda ou do escoamento gerado pelo movimento do casco em água de outra forma parada.

Assumindo que qualquer estado de agitação incidente no navio pode ser decomposto em ondas sinusoidais de período e direcções conhecidos, a força de difracção associada a esse estado de agitação pode obter-se da sobreposição das forças de difracção estacionárias devidas a cada uma das componentes sinusoidais referidas. Ou seja, resultados do problema de difracção obtidos no domínio da frequência podem ser utilizados para obter um resultado do domínio do tempo.

Também as funções de resposta a impulso e as massas adicionadas para frequência infinita podem ser determinadas a partir de resultados obtidos no domínio da frequência, agora para o problema de radiação:

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty b_{kj}(\omega)\cos(\omega t)d\omega \tag{3}$$

$$m_{kj} = a_{kj}(\omega) + \frac{1}{\omega}\int_0^\infty K_{kj}(t)\sin(\omega t)d\omega \tag{4}$$

em que $b_{kj}(\omega)$ é o coeficiente de amortecimento para a frequência ω e $a_{kj}(\omega)$ o coeficiente de massa adicionada para a mesma frequência. Da Equação (4) fica clara a designação de m_{kj} como o coeficiente de massa adicionada para frequência infinita pois quando a frequência ω tende para infinito a segunda parcela da soma na Equação (4) tende para zero e $m_{kj} = a_{kj}(\infty)$. Os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento resultam da

decomposição da força estacionária associada ao problema de radiação correspondente à frequência ω numa parcela em fase com a velocidade do movimento do corpo, donde surge o coeficiente de amortecimento, e uma parcela em fase com a aceleração (ou o movimento do corpo, porque este movimento é sinusoidal), donde surge o coeficiente de amortecimento.

A utilização de resultados do domínio da frequência para gerar dados para um problema no domínio do tempo deve-se à maior disponibilidade de modelos numéricos para resolver, no domínio da frequência, o problema da interacção de um corpo flutuante com as ondas.

O WAMIT [5] é um desses modelos. Trata-se de um modelo desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica *do Massachusetts Institute of Technology* e que utiliza um método de painel para resolver no domínio da frequência os problemas de radiação e de difracção de um corpo flutuante livre. Este modelo baseia-se na segunda igualdade de Green para determinar a intensidade das distribuições de fontes e dipolos nos painéis utilizados na discretização da superfície molhada do casco do navio com as quais é possível gerar os potenciais harmónicos dos escoamentos associados aos problemas de radiação e de difracção de um navio livre colocado numa zona de profundidade constante mas não limitada horizontalmente.

2.3.3. Relações de Haskind

O modelo WAMIT contempla a existência de vários corpos flutuantes, alguns dos quais podem estar imóveis e ocupando a totalidade da coluna líquida, o que permitiria a utilização direta deste modelo na simulação dos problemas de radiação e difração de um navio no interior de uma bacia abrigada em que a onda incidente no navio pode ter sido difratada pelas estruturas de proteção do porto. Este detalhe da eventual curvatura das cristas das ondas incidentes no navio é especialmente importante para o problema de difração, uma vez que para o problema de radiação é pouco provável que as ondas radiadas pelo navio e reflectidas no contorno da bacia portuária consigam voltar ao navio com amplitude não desprezável.

Embora seja possível estudar com o modelo WAMIT o problema de difração de um navio no interior de uma bacia abrigada, o número de equações que seria necessário resolver nessa situação ainda é exagerado para a maioria dos meios de cálculo atualmente disponíveis. Uma alternativa para a resolução deste problema de difração é a utilização das relações estabelecidas por Haskind [7]. Tais relações permitem determinar F_k^D, a força do problema de difração segundo a coordenada k, partindo de φ_k, o potencial do potencial do escoamento associado ao problema de radiação em que o navio oscila segundo a mesma

coordenada k, e de φ_0, o potencial do escoamento associado à onda incidente na posição em que o navio será colocado.

$$F_k^D = -i\rho\omega\int_S \left(\varphi_0 \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} - \varphi_k \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \right) dS e^{-i\omega t} \tag{55}$$

Assumindo válida a hipótese de declive suave, para determinar as funções necessárias à aplicação da relação de Haskind é necessário conhecer:

- Período da onda incidente;
- Os potenciais dos problemas de radiação do navio no interior da bacia portuária em cada painel da discretização da área molhada do casco do navio;
- As derivadas normais dos mesmos potenciais nos mesmos painéis;
- As coordenadas dos pontos onde se pretende determinar aquelas funções (em cada painel, as coordenadas dos quatro pontos da fórmula de quadratura Gauss utilizada);
- As componentes do vector normal a cada painel;
- A profundidade na vertical de cada ponto da alínea anterior;
- As amplitudes complexas da elevação da superfície livre e das componentes horizontais da velocidade do escoamento induzido pela passagem das ondas.

Os cinco primeiros requisitos são satisfeitos pelos ficheiros de resultados do modelo numérico WAMIT, sendo que os dois primeiros estão no conjunto de resultados relativos ao problema de radiação enquanto os três últimos estão nos ficheiros de caracterização da geometria do problema. Os dois últimos requisitos são satisfeitos com os resultados do modelo que determina a propagação das ondas para o interior da bacia portuária quando o navio lá não está. O programa que trata de implementar as relações de Haskind combinando resultados do modelo WAMIT para os problemas de radiação com o campo de ondas incidente na posição do navio, apenas tem que gerir esta informação e efectuar um integral de superfície utilizando uma fórmula de quadratura de Gauss. No caso presente é a mesma utilizada pelo modelo WAMIT.

3. APLICAÇÕES

Apresentam-se dois exemplos de utilização do pacote SWAMS:

- Um navio amarrado no interior de um porto esquemático em que as ondas incidentes no navio não são difratadas pelo quebra-mar de proteção do porto (o que permite utilizar o modelo WAMIT na sua forma mais simples para resolução do problema de difração)

- Um corpo flutuante livre junto a um quebra-mar vertical (para mostrar os primeiros resultados dos testes já realizados com a implementação do procedimento de cálculo das forças de difração a partir das relações de Haskind).

3.1. Navio amarrado num porto esquemático

Nesta secção apresenta-se uma aplicação do pacote numérico para avaliação do comportamento dum navio amarrado colocado no interior de uma bacia portuária esquemática sujeito a um estado de mar incidente no exterior dessa bacia. Esta aplicação numérica serve para ilustrar o funcionamento do SWAMS, i.e., do conjunto de modelos BOUSS-WMH, WAMIT, e BAS e chamar a atenção para as modificações necessárias a uma aplicação mais generalizada.

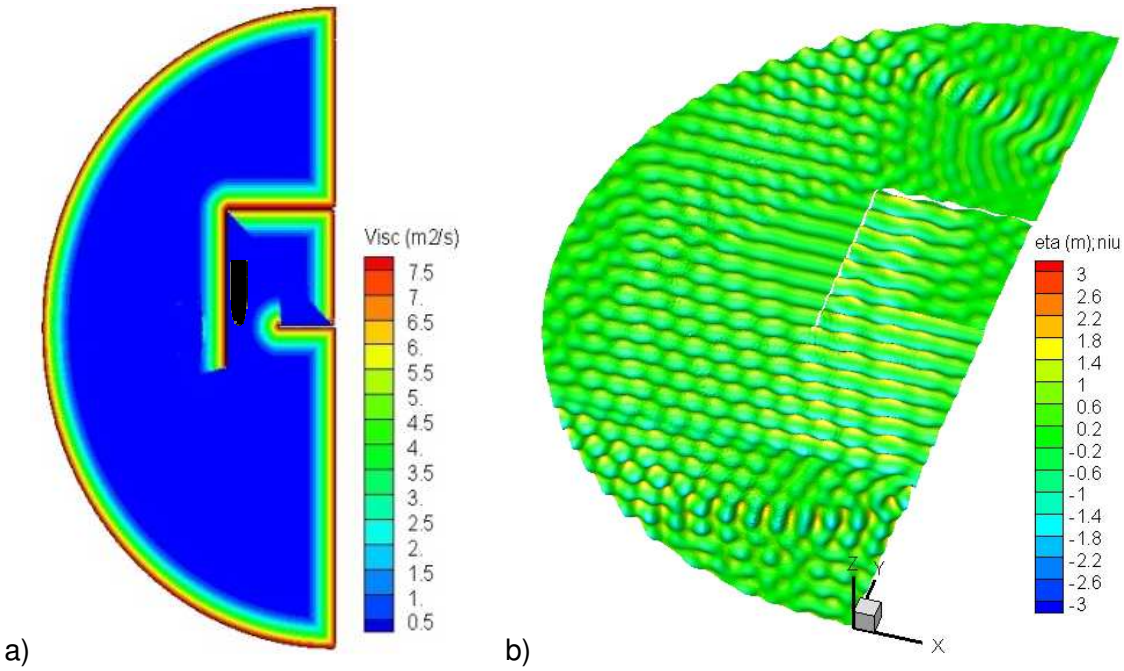
A metodologia seguida é a seguinte:

1. Utilizando o modelo BOUSS-WMH, determinam-se as características da agitação marítima na posição que será ocupada pelo navio imóvel dentro da bacia portuária;
2. Utilizando o modelo WAMIT, obtêm-se os potenciais dos problemas de radiação e de difracção para um conjunto de períodos no qual estão contidos os vários períodos componentes daquela agitação incidente;
3. Determinam-se depois as funções de resposta a impulso do navio livre e as séries temporais das forças exercidas pela agitação marítima incidente no navio;
4. Utilizando o modelo BAS, resolve-se, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado no posto de acostagem levando em conta as séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio, as funções de resposta a impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração.

Os cálculos de propagação de ondas são efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM, enquanto os cálculos do comportamento do navio são efectuados num computador pessoal Intel™ Quad Core Q6600 de 2.4Ghz e com 1.97GB de memória RAM.

3.1.1. Ondas incidentes no navio

O domínio de cálculo tem 2000 m de largura por 4000 m de comprimento. O porto esquemático situado na lateral direita é constituído por dois quebra-mares: o quebra-mar Norte constituído por dois troços, horizontal e vertical de 750 m e 1000 m de comprimento, respectivamente, e o quebra-mar Sul com um troço horizontal de 400 m, definindo uma bacia aproximadamente quadrangular com 700 m de lado, Figura 1.



a) b)

Figura 1 – a) Domínio de cálculo. b) Elevação da superfície livre ao fim de 600 s para ondas regulares com período de 10 s e amplitude de 0.6m provenientes de Sul (O Norte coincide com a direcção do eixo dos yy).

A malha de elementos finitos do modelo BOUSS-WMH foi gerada de modo ter um mínimo de oito pontos por comprimento de onda, sendo a profundidade em todo o domínio igual a 17 m e as ondas incidentes regulares com período de 10 s e amplitude de 0.6 m. Resultou então uma malha com 185599 elementos, 93616 pontos, 1631 pontos de fronteira e largura de banda de 322. A área mínima dos elementos é de 7.49 m^2 e a máxima de 93.14 m^2.

A Figura 1 apresenta a elevação da superfície livre 600s depois de iniciado o cálculo com o módulo BOUSS-WMH com ondas regulares provenientes de Sul (propagando-se no sentido positivo do eixo yy) com 10s de período e amplitude de 0.6m. Como se pode inferir da FIGURA 1, o navio está claramente protegido das ondulações provenientes de Norte e Noroeste, ao contrário do que se verifica quando as ondulações são de Sul e de Sudoeste. Na FIGURA (1a) apresenta-se a série temporal da elevação da superfície livre num ponto no interior do porto, na zona em que o navio será amarrado, para a mesma onda incidente de sul.

3.1.2. Resposta do navio amarrado

O navio cujo comportamento se estudou tinha um volume deslocado de 108416 m^3, um comprimento na flutuação de 243 m, uma boca máxima de 42 m e um calado de 14 m. Uma vez que se pretende ilustrar apenas o funcionamento do modelo numérico para o

comportamento do navio amarrado, o esquema de amarração daquele navio foi muito simples, apenas com dois travêzes (l1 e l4) e duas regeiras (l2 e l3) e duas defensas (f1 e f2), como mostrado na FIGURA 2. O eixo longitudinal do navio estava paralelo ao molhe ao qual foi amarrado com a proa distando 98 m da extremidade sul daquele molhe. Todos os cabos de amarração eram de polietileno, tinham uma tracção máxima de 1274 kN e comprimentos semelhantes (logo relações constitutivas semelhantes). A relação constitutiva de um desses cabos é apresentada na FIGURA (2a). As defensas pneumáticas tinham uma força de compressão máxima de 3034 kN, a relação constitutiva apresentada na FIGURA (2b) e o coeficiente de atrito com o casco do navio de 0.35. Neste exercício vai admitir-se que a onda incidente no navio se propaga com crista rectilínea perpendicular ao molhe do porto onde o navio está amarrado. Tal hipótese torna mais simples a análise e permite utilizar directamente os resultados obtidos com o modelo numérico WAMIT para o problema de difracção do navio livre.

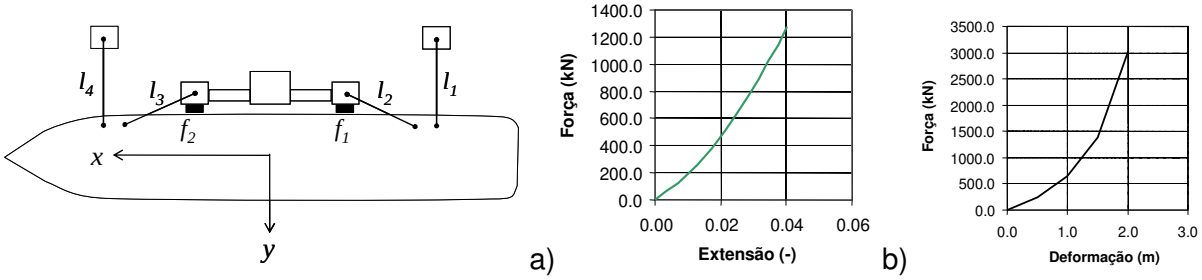


Figura 2 – Esquema da amarração do navio. Relações constitutivas: a) amarras; b) defensas.

No estudo, no domínio da frequência, da interacção do navio livre com as ondas considerou-se que apenas a parede do molhe próximo deste tem influência naquela interacção. Assim modelou-se o navio próximo a uma parede vertical com 750 m de comprimento, 50 m de largura e que ocupava a totalidade da coluna líquida, isto é, com uma altura de 17 m. O bordo do navio mais próximo da parede distava desta 30 m e a proa do navio distava 98 m da extremidade da parede.

A superfície molhada do casco do navio foi dividida em 3732 painéis enquanto a parede foi dividida em 1284 painéis. A FIGURA 3 mostra uma perspectiva daquelas distribuições de painéis. Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difracção do navio livre para 76 frequências igualmente espaçadas entre 0.0125 rad/s e 0.95 rad/s.

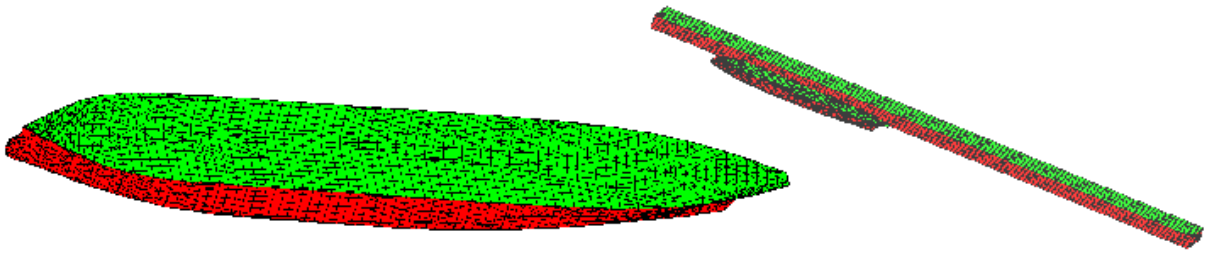


Figura 3 – Perspectivas das distribuições de painéis utilizadas para formar as superfícies molhadas do casco do navio e da parede vertical próxima do navio utilizadas pelo modelo WAMIT.

Como seria de esperar, a proximidade da parede vertical destrói a simetria do escoamento em torno do navio existente na ausência desta. Assim, os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento que seriam nulos no problema de radiação do navio isolado deixam de o ser (por exemplo, o acoplamento entre o avanço e o abatimento).

Também no problema de difracção, a presença da parede pode alterar a simetria do escoamento passando a surgir forças não nulas que o eram na ausência da parede. Um exemplo disso é a força transversal no navio que surge para ondas provenientes de proa quando existe a parede próximo do navio.

Com os resultados do problema de radiação no domínio da frequência, determinaram-se as funções de resposta a impulso e os coeficientes de massa adicionada para frequência infinita necessários à montagem das equações de movimento do navio amarrado. Todas funções resposta a impulso foram calculadas com intervalo de tempo de 0.1 s e uma duração máxima de 200 s.

Partindo das funções de resposta a impulso para os 36 pares possíveis (força segundo a coordenada k devida a movimento de velocidade impulsiva segundo a coordenada j) e dos correspondentes valores do coeficiente de massa adicionada para as diversas frequências em que se resolveu o problema de radiação no domínio da frequência e utilizando a Equação (4) determinaram-se várias estimativas para a massa adicionada para frequência infinita.

As séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio foram determinadas utilizando a série temporal da elevação da superfície livre estimada para um ponto da zona onde o navio será amarrado e os resultados do problema de difracção no domínio da frequência para ondas de proa. Face às limitações do procedimento de obtenção das séries temporais das forças, baseado na transformada rápida de Fourier, apenas se pôde considerar os primeiros 500 s da série temporal da elevação da superfície livre. A FIGURA (4b) mostra a série temporal da força longitudinal exercida pelas ondas incidentes

no navio. Na figura pode observar-se outra limitação do procedimento implementado para o cálculo da série temporal: surgem oscilações na série temporal antes da chegada da onda ao local onde o navio está amarrado (cerca do instante t=90 s) que não são fisicamente possíveis.

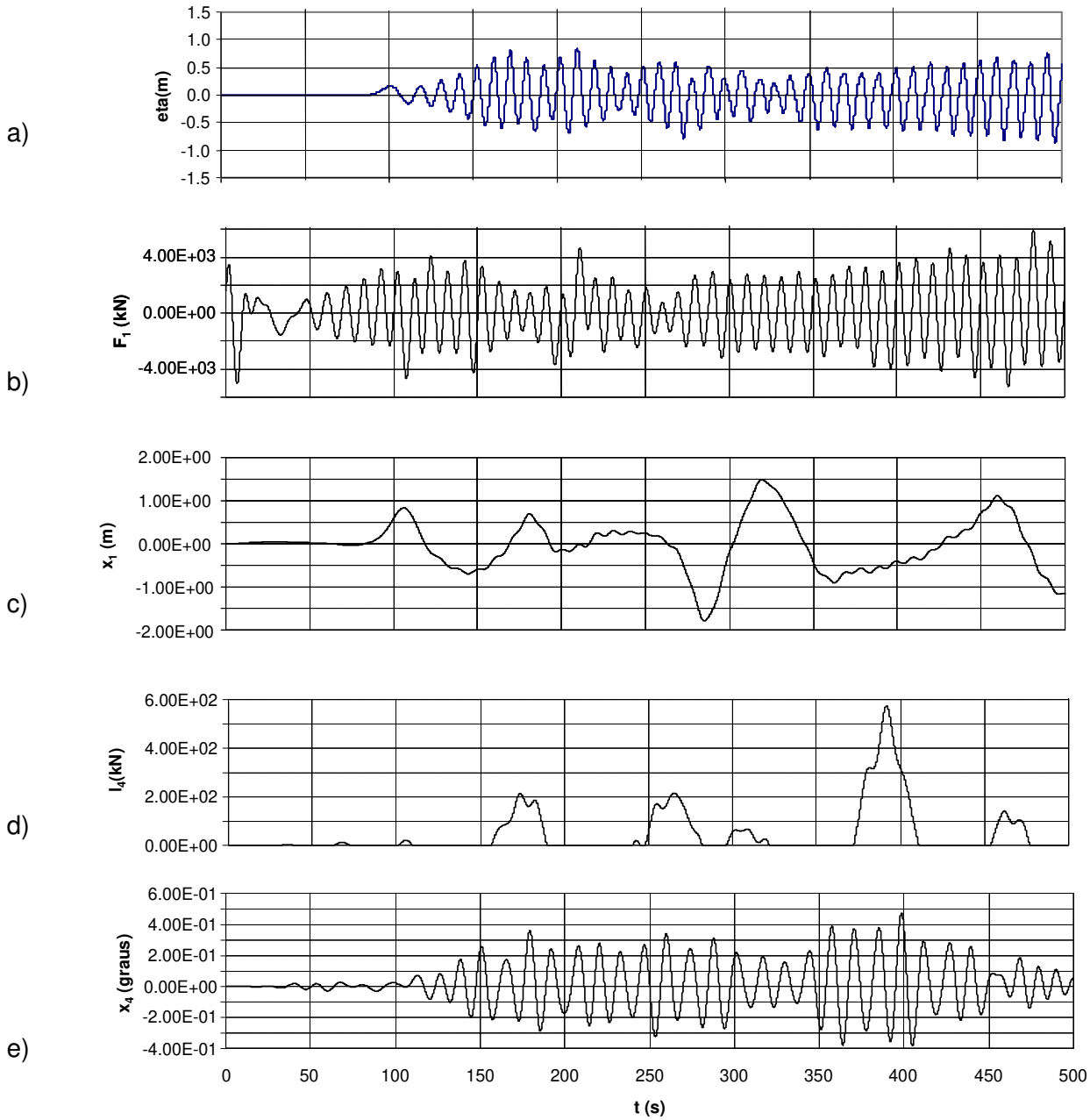


Figura 4 – Séries temporais navio amarrado no interior do porto para ondas provenientes de sul. a) elevação da superfície livre na zona onde o navio será amarrado; b) forças longitudinais no navio; c) movimento longitudinal do navio amarrado; d) tração no través de proa; e) movimento de rolo do navio amarrado.

A série temporal dos movimentos segundo o eixo longitudinal do navio amarrado, apresentada na FIGURA (4c), ilustra bem o carácter não linear da resposta do conjunto navio + sistema de amarração. Com efeito, para ondas oscilações da superfície livre cujo período é cerca de 10 s, observam-se oscilações de período muito superior. O período destas oscilações é controlado pela existência das amarras e das defensas, como pode confirmar-se na FIGURA (4d) com a série temporal dos esforços no travês de proa. Uma vez que os elementos do sistema de amarração produzem forças actuantes no navio no plano horizontal apenas, é para os movimentos neste plano que o comportamento não linear é mais evidente. Tal pode confirmar-se com a série temporal apresentada na FIGURA (4e) relativa ao movimento de rolo onde se observa que o período da oscilação segundo este modo é semelhante ao período da onda incidente no navio.

3.1. Navio livre próximo a uma parede vertical

A geometria deste exemplo é muito semelhante à utilizada no exemplo anterior para resolução dos problemas de radiação e de difração com o modelo WAMIT: a parede vertical tem 750 m de comprimento, 50 m de largura e ocupa a totalidade da coluna líquida que neste caso tem 20 m de altura. O corpo flutuante agora é um paralelepípedo com 120 m de comprimento, 20 m de boca e 10 m de calado. O bordo do corpo flutuante mais próximo da parede dista desta 30 m e a “proa” do corpo flutuante dista 115 m da extremidade da parede.

A superfície molhada do corpo flutuante foi dividida em 1200 painéis enquanto a parede foi dividida em 1284 painéis. A FIGURA 5 mostra uma perspectiva daquelas distribuições de painéis. Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difracção do navio livre para 16 períodos entre 4 s e 300 s e cinco rumos ao largo: 0º (ondas propagando-se no sentido positivo do eixo x), 30º, 60º, 90º (ondas propagando-se no sentido positivo do eixo y) e 270º. O modelo DREAMS foi utilizado para fornecer o potencial da onda incidente na posição a ocupar pelo navio. O domínio do modelo é quadrangular com 1400 m de lado e foi discretizado com 161186 nós definindo 320068 elementos triangulares.

A Figura 6 apresenta as forças de difração para ondas de 0º obtidas da resolução do problema de difração com o modelo WAMIT, bem como as forças obtidas da aplicação das relações de Haskink intrínsecas do mesmo modelo (em que o potencial da onda incidente é fornecido pelo modelo WAMIT) e a aplicação das relações de Haskind em que o potencial da onda incidente é fornecido pelo modelo DREAMS e o potencial de radiação é o fornecido pelo modelo WAMIT (linha HASK MODIF na referida figura). Para estas ondas incidentes, que praticamente não são difratadas pela parede vertical, os resultados são quase todos

coincidentes, o que indicia a bondade da metodologia implementada. Contudo, os resultados obtidos para outros ângulos de incidência não são tão bons e ainda se investigam as causas para as diferenças observadas.

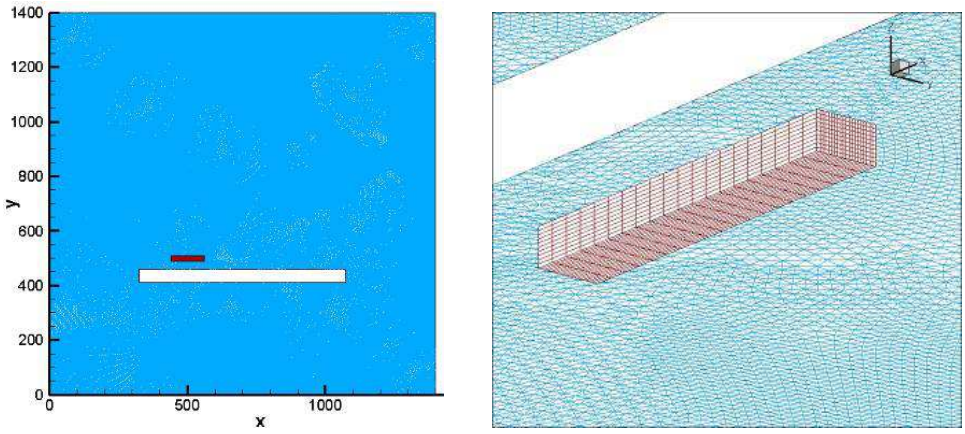


Figura 5 – Domínio de cálculo do DREAMS. Malha de elementos finitos, localização do navio e discretização em painéis do navio.

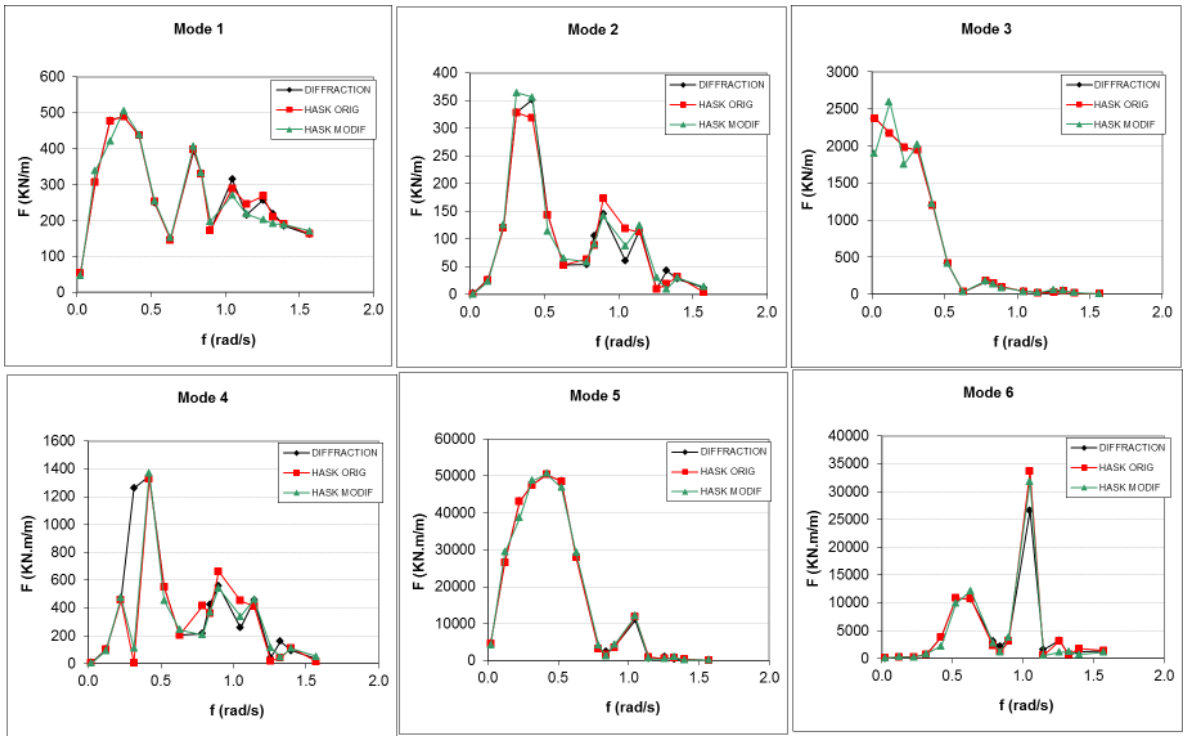


Figura 6 – Forças devidas às ondas incidentes (□=90º) segundo os seis graus de liberdade do navio.

4. CONCLUSÕES

Apresentaram-se neste artigo os resultados obtidos com o pacote numérico SWAMS na modelação do comportamento de um navio amarrado no interior de uma bacia abrigada de forma quadrangular com cerca de 700 m de lado. As séries temporais dos movimentos do navio e dos esforços no sistema de amarração ilustram claramente o comportamento não linear do sistema navio-amarras-defensas.

Os resultados foram obtidos para uma onda cuja direção de propagação coincidia com a do quebra-mar de proteção do porto, o que facilitou a determinação das forças do problema de difração, isto é, as forças exercidas pelas ondas incidentes no navio parado. Para resolver problemas mais complexos, em que a onda incidente no navio parado pode ter sido difractada pelas obras de abrigo da bacia portuária ou por outros obstáculos ao longo da sua propagação, testou-se um procedimento baseado nas chamadas relações de Haskind e que combina o potencial das ondas incidentes na posição do navio. No exemplo de teste apresentado o potencial das ondas incidentes na posição em que o navio seria colocado foi determinado a partir de um modelo linear para propagação de ondas. Concluída a validação deste procedimento, cujos resultados iniciais aqui apresentados são bastante promissores, o modelo de propagação de ondas será substituído por um mais complexo do tipo Boussinesq.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FORTES, C.J.E.M. **Modelação matemática da refracção e da difracção combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos).** Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica), IST, Lisboa, Portugal, 1993.

[2] PINHEIRO, L.V. **Um método de elementos finitos para a discretização das equações de Boussinesq estendidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), IST, Lisboa, Portugal, 2007.

[3] PINHEIRO, L., FERNANDES, J.L.M., FORTES, C.J.E.M. Finite Element Mesh Generator with Local Density Conditioned to Bathymetry for Wave Propagation Models in Coastal Zones. **Proc. of EUA4X@IAC 06**, Roma Italy, 2006. IMACS Series in Comp.and Applied Mathematics. v.12, p71-80, 2007.

[4] SANTOS, J.A., **MOORNAV – Numerical model for the behaviour of moored ships**. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves. 1994

[5] KORSEMEYER F.T., LEE C.-H., NEWMAN J.N., SCLAVOUNOS P.D. The analysis of wave effects on tension-leg platforms, **7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Houston, Texas, p. 1-14, 1988

[6] MYNETT, A.E., KEUNIG, P.J., VIS, F.C. The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. **Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham**, England, . Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre, 1985.

[7] HASKIND, M.D. The exciting forces and wetting of ships in waves (em russo), Izvestia Akademii Nauk S.S.S.R, **Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk**, 7, 65-79. (tradução na língua inglesa: David Taylor Model Basin Translation Nº.307, March 1962). 1957.

[8] BOOIJ, N., HOLTHUIJSEN, L.H., RIS, R.C. The SWAN wave model for shallow water. **Proc. International Conference on Coastal Engineering ICCE´96**, Orlando, p. 668-676, 1996.

[9] NWOGU, O.. Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 119, n. 6, p. 618-638, 1993.

[10] CUMMINS, W.E., Impulse response function and ship motions. **Schiffstechnik**, v. 9, p. 101-109, 1962.

[11] WALKLEY, M., BERZINS, M. A finite element method for the two-dimensional extended Boussinesq equations**. International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 39, n. 2, p.865–885, 2002

[12] BERZINS, M.; FURZELAND, R.M.; SCALES L.E. **A user's manual for SPRINT -a versatile software package for solving systems of algebraic, ordinary and partial differential equations: Part 3 – advanced use of SPRINT**. Technical Report TNER.85.058, Thornton Res. C, Chester. 1985.

[13] WEI G., KIRBY J.T., SINHA A. Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. **Coastal Engineering**, v. 36, p. 271 – 299, 1999.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/82637/2011 e do projecto HIDRALERTA - PTDC/AAC-AMB/120702/2010.