

Comportamento de navios no interior de portos sujeitos à acção das ondas

L. Pinheiro (1), J. Santos (2) e C. Fortes (1)

- (1) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC. lpinheiro@lneec.pt
 (2) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Resumo: Nesta comunicação descreve-se um procedimento para avaliação das forças exercidas pela agitação marítima incidente num navio colocado no interior de uma bacia abrigada.

O procedimento referido resolve o problema da difracção das ondas com base nos potenciais das ondas radiadas pelos movimentos do navio e no potencial da onda incidente na posição do navio quando ele lá não está. Este último potencial contém toda a informação relativa à propagação das ondas no interior da bacia abrigada. Deste modo e utilizando as relações de Haskind é possível calcular as forças de excitação no navio devidas às ondas nele incidentes. Trata-se de uma abordagem promissora pois evita a resolução directa do problema de difracção, o que implicaria a discretização da totalidade da fronteira da bacia portuária.

Os resultados apresentados nesta comunicação foram obtidos utilizando o potencial da onda incidente fornecido pelo modelo DREAMS, baseado na versão elíptica da equação de declive suave, e o potencial de radiação fornecido pelo modelo WAMIT, que simula o comportamento de corpos flutuantes isolados.

Palavras chave: comportamento de navios, portos, propagação de ondas.

1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima pode perturbar as actividades de carga e descarga de navios bem como causar problemas significativos nas infra-estruturas portuárias e nas embarcações presentes no interior de um porto. A previsão e correcta caracterização do campo de ondas dentro do porto, mais precisamente, ao longo das trajectórias dos navios e nos postos de acostagem permite determinar a resposta dos navios aos estados de mar neles incidentes, quer estejam atracados ou a navegar.

A acoplagem de modelos numéricos de propagação de ondas com um modelo de comportamento de navios sujeitos à acção dessas mesmas ondas permite prever condições potencialmente adversas e planear as actividades portuárias com segurança. Note-se que ferramentas numéricas deste tipo são ainda escassas e com algumas limitações.

Em geral, a interacção onda-estrutura flutuante e uma geometria teórica do porto pode ser efetuada com recurso à teoria linear. O método dos elementos de fronteira é usado para simular a influência de uma parede vertical infinita ou duas paredes verticais perpendiculares nos coeficientes hidrodinâmicos do navio, (van Oortmerssen, 1976); (Sawaragi e Kubo, 1982). No entanto, este método é impraticável se se pretender incluir a geometria exacta do porto, devido às dimensões das matrizes envolvidas. Contudo, uma correcta representação da geometria do porto é importante para se ter em conta os modos evanescentes junto ao navio e melhor descrever o campo de ondas que actua sobre ele. A abordagem que tem sido desenvolvida nos últimos anos é a de acoplar modelos distintos para resolver a propagação de ondas no porto e a interacção ondas-navio numa zona restrita junto deste. Sawaragi *et al.* (1989), por

exemplo, utilizou um modelo bidimensional de elementos de fronteira considerando a geometria exacta do porto mas com fundo plano e, junto ao navio, um modelo tridimensional. Takagi *et al.* (1993) fez o mesmo mas utilizou um modelo de *mild-slope* que incluía a variação da topografia do fundo. Mais recentemente, (Ohyama e Tsuchida, 1997) deduziram uma equação de *mild-slope* modificada que inclui os modos evanescentes podendo ser aplicada também nas proximidades do navio. (Kubo e Sakakibara, 1997) juntaram um modelo linear no domínio da frequência para o cálculo dos factores de amplificação de ondas longas no porto com o modelo do comportamento do navio amarrado. A vantagem deste método é que cada componente da onda pode ser tratada separadamente, assumindo que as ondas são lineares.

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados da aplicação de um método para avaliar a força de excitação exercida pela agitação incidente num navio colocado no interior de uma bacia abrigada utilizando uma adaptação das relações de Haskind. Com o modelo DREAMS (Fortes, 2002) determinam-se as características da agitação marítima na posição que será ocupada pelo navio imóvel levando em conta todos os fenómenos relevantes para a propagação da onda para o interior do porto. Os potenciais correspondentes são depois combinados com os potenciais do problema de radiação. Uma vez que os potenciais deste problema podem ser obtidos considerando configurações muito simples para o conjunto navio – fronteira do porto, este é um método promissor para a resolução do problema de difracção.

Na secção 2 descreve-se sucintamente a metodologia desenvolvida. Na secção 3 é descrita a aplicação numérica. A secção 4 é a dos comentários finais.

2. INTERACÇÃO DE CORPOS FLUTUANTES COM ONDAS

2.1 Potencial de velocidades

Seja ϕ o potencial de escoamento quando o navio se move sob a ação de ondas. Da linearidade do sistema navio/ondas é possível decompô-lo na soma de vários potenciais devidos cada um deles a uma das seguintes causas, (Tuck 1970): onda incidente, ϕ_0 , onda difratada pelo navio parado, ϕ_7 , ondas geradas pelo movimento do navio em águas de outro modo paradas, segundo cada uma das seis coordenadas generalizadas ϕ_1 a ϕ_6 .

$$\phi = \text{Re} \left[\sum_{j=0}^7 \phi_j \right] \quad (1)$$

$$\phi = \left[\phi_0 + \phi_7 + \sum_{j=1}^6 -i\omega\phi_j \varepsilon_j \right] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

onde ϕ_j é um potencial complexo estacionário e ε_j é a amplitude complexa do movimento do corpo segundo a coordenada j .

A força actuante segundo cada uma das coordenadas k vem dada por:

$$F_k = F_k^D + F_k^R \quad (3)$$

A primeira parcela da soma anterior representa a força associada ao problema de difração

$$F_k^D = i\rho\omega \int_S (\phi_0 + \phi_7) n_k e^{-i\omega t} dS \quad (4)$$

enquanto a segunda força está associada ao problema de radiação

$$F_k^R = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^6 -\rho\omega^2 \int_S \phi_j n_k dS \varepsilon_j e^{-i\omega t} \right] \quad (5)$$

Nas expressões anteriores, S representa a superfície molhada do corpo flutuante e n_k a normal segundo a coordenada generalizada k .

2.2 Relações de Haskind

Uma generalização das componentes do vector normal à superfície do corpo permite estudar a interação de ondas monocromáticas com vários corpos alguns dos quais podem estar fixos, isto é, constituir obstáculos em torno dos quais as ondas difratam.

A solução numérica das equações, quer para um corpo apenas, quer para vários corpos, passa pela distribuição de painéis pelas fronteiras sólidas do problema, sejam elas imóveis ou flutuantes. Face ao exposto, não seria difícil estudar a interação com ondas monocromáticas de um navio no interior de um porto. Contudo, tal pode levar a um número tão grande de painéis que torna impossível a solução numérica do problema.

Embora para o problema de radiação seja uma boa aproximação considerar apenas a fronteira do porto mais próxima do navio, o que reduz

substancialmente o número de painéis a utilizar, para o problema de difração é sempre necessário levar em conta as transformações sofridas pela onda incidente na sua propagação ao longo do domínio. Utilizando a segunda igualdade de Green é possível mostrar que não é necessário determinar o potencial da onda difratada pelo corpo, ϕ_7 , para calcular as componentes da força associada ao problema de difração, equação (4).

Atendendo às condições de fronteira nas superfícies sólidas do domínio nos problemas de radiação e de difração e à igualdade anterior, a equação de definição da força associada ao problema de difração pode escrever-se da forma apresentada em Haskind 1957:

$$F_k^D = -i\rho\omega \int_S \left(\phi_0 \frac{\partial \phi_k}{\partial n} - \phi_k \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \right) dS e^{-i\omega t} \quad (6)$$

Assim, em vez de se determinar o potencial associado ao problema da difração ϕ_D para conhecer o valor da componente segundo k da força exercida pelas ondas no navio parado, basta conhecer o potencial da onda incidente nos pontos ocupados pela superfície molhada do corpo ϕ_0 , bem como os potenciais associados ao problema de radiação para os mesmos pontos ϕ_k .

2.3 Implementação numérica

Para a resolução dos problemas de radiação e de difração no domínio da frequência, é utilizado o modelo WAMIT (Korsemeier et al. 1988), 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 difração de um corpo flutuante livre colocado numa zona de profundidade constante mas não limitada horizontalmente.

No modelo WAMIT é trivial a determinação do potencial da onda monocromática incidente e da respectiva derivada segundo a normal ao painel nos pontos da fórmula de quadratura de Gauss correspondentes à posição do navio imobilizado. Com efeito, uma vez que o navio está numa zona não limitada horizontalmente, a onda que incide na posição do navio, quando ele lá não está, é simplesmente uma onda de crista rectilínea cujo potencial e derivada segundo uma direção qualquer, têm fórmulas bem definidas.

Na implementação das relações de Haskind que se pretende realizar agora a onda monocromática incidente na posição do navio poderá já ter sido refractada ou difractada antes de chegar a esta posição. O campo correspondente a esta onda pode ser caracterizado a partir das amplitudes complexas da elevação da superfície livre, $\eta(x,y)$, e das componentes horizontais, $U_0(x,y)$ e $V_0(x,y)$ no nível de repouso, $z=0$, da velocidade do escoamento por

ela induzido. Da condição de fronteira dinâmica linearizada da superfície livre, tem-se, em $z = 0$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial t} = g\eta \Rightarrow \omega \phi_0 = g\eta \quad (7)$$

Assumindo válida a hipótese de declive suave, então a variação na vertical do potencial de velocidades será do tipo:

$$\varphi_0(x, y, z) = \varphi_0(x, y, z = 0) \cosh[k(d+z)] / \cosh kd \quad (8)$$

Assim, conhecida a elevação da superfície livre é possível determinar o potencial $\varphi_0(x, y, z)$ em qualquer cota z

$$\varphi_0(x, y, z) = \frac{g}{\omega} \eta(x, y) \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh kd} \quad (9)$$

A mesma hipótese de declive suave permite relacionar as amplitudes complexas das componentes horizontais da velocidade a qualquer cota com as amplitudes respectivas das mesmas componentes no nível de repouso:

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial x} = u(x, y, z) = U_0(x, y) \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh kd} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial y} = v(x, y, z) = V_0(x, y) \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh kd} \quad (11)$$

Para se obter a amplitude complexa da componente vertical da velocidade do escoamento induzido pela onda basta derivar a equação (9) em ordem a z , resultando então

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial z} = \frac{gk}{\omega} \eta(x, y) \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh kd} \quad (12)$$

Do produto interno do vector velocidade do escoamento com a normal ao painel obtém-se a componente normal ao painel do vector velocidade ou a derivada segundo a normal ao painel do potencial do escoamento gerado pela passagem da onda.

3. VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Modelaram-se dois casos de teste: Teste 1, navio livre sem obstáculos e Teste 2, navio livre próximo a uma parede vertical.

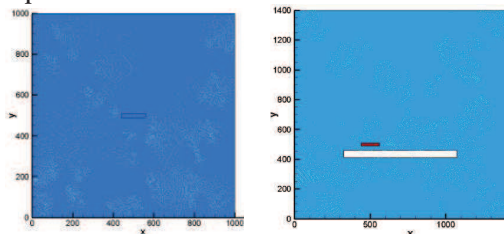


Fig. 1: Domínios de cálculo do DREAMS e localização do navio.

3.1 Caso teste 1

A superfície molhada do casco do navio foi dividida em 1200 painéis. Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difração do navio livre para 64 condições de agitação distintas (16 períodos entre 4s e 300s, e quatro direções 0° , 30° , 60° e 90°)

O domínio de cálculo é quadrangular com 1000m de largura estando o navio colocado no centro do domínio. As fronteiras são abertas, pelo que não existem reflexões. A malha de elementos finitos tem 226152 nós e 113717 elementos triangulares. Com o DREAMS simularam-se as mesmas 64 condições de agitação. Na Fig. 2 apresentam-se dois exemplos da distribuição dos potenciais de velocidades no domínio. Note-se que os potenciais são grandezas complexas estando apenas representada a parte real desta variável

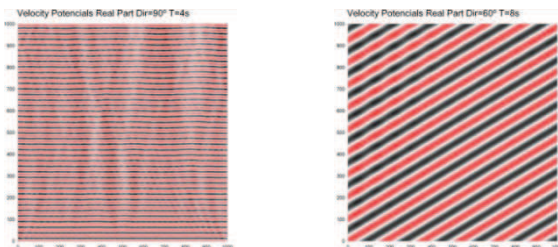


Fig. 2: Potenciais de velocidade para duas das condições de cálculo simuladas.

Utilizando os potenciais de velocidade calculados pelo modelo DREAMS e com as relações de Haskind obtomos as forças exercidas pela ação das ondas sobre o navio segundo cada um dos seis graus de liberdade. Na Fig. 3 comparamos essas forças com as mesmas calculadas com o WAMIT pelo método de Haskind e pelo método da difração. Da análise destas figuras pode ver-se que existe uma grande concordância nos resultados e que é maior para os períodos altos: os erros relativamente ao método de Haskind original do WAMIT são da ordem de 5%.

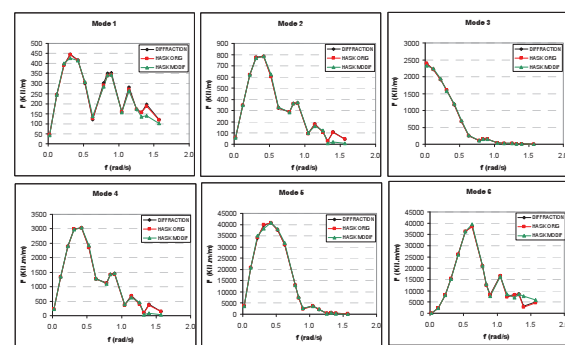


Fig. 3: Forças devidas às ondas incidentes ($\theta=30^\circ$) segundo os seis graus de liberdade do navio.

3.2 Caso teste 2

O navio livre encontra-se próximo a uma parede vertical com 750 m de comprimento, 50 m de largura e que ocupa a totalidade da coluna líquida, isto é, com uma altura de 20 m. O bordo do navio mais próximo da parede dista desta 30 m e a proa do navio dista 115 m da extremidade da parede.

A superfície molhada do casco do navio foi dividida em 1200 painéis enquanto a parede foi dividida em 1284 painéis. Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de

difração do navio livre para 16 períodos entre 4s e 300s, e cinco direções 0°, 30°, 60°, 90° e 270°.

Na Fig. 4 apresentam-se dois exemplos da distribuição dos potenciais de velocidades no domínio obtidos com o modelo DREAMS.

As forças exercidas pela ação das ondas sobre o navio segundo cada um dos seis graus de liberdade são calculadas da mesma forma descrita para o teste 1. Na Fig. 5 comparam-se essas forças com as mesmas calculadas com o WAMIT pelo método de Haskind e pelo método da difração.

Neste teste, com campos de potenciais de velocidade bastante mais complexos, pode ver-se que a concordância nos resultados não é tão boa quanto no primeiro teste. Por outro lado, não existe uma tendência clara de aproximação dos resultados à medida que o período aumenta, o que pode indicar que os valores de referência podem não estar correctos, talvez devido a uma discretização insuficiente do navio. No entanto os valores parecem seguir o mesmo andamento geral e estão dentro da mesma ordem de grandeza.

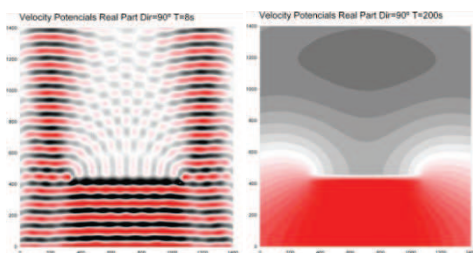


Fig. 4: Potenciais de velocidade para duas das condições de cálculo simuladas.

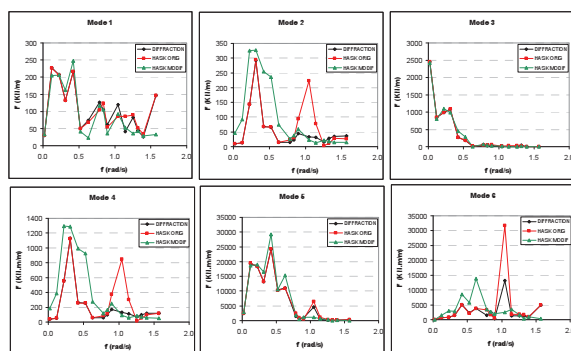


Fig. 5: Forças devidas às ondas incidentes ($\theta=30^\circ$) segundo os seis graus de liberdade do navio.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Descreveu-se um procedimento para avaliação das forças exercidas pela agitação marítima incidente num navio colocado numa zona abrigada. Este procedimento baseia-se nas relações de Haskind para calcular a força de excitação devida a ondas incidentes num corpo flutuante imobilizado, o chamado problema de difração.

A grande vantagem deste método é que permite ter em conta fenómenos complexos de propagação das ondas, incluindo refração, difração e reflexões e

evitando a discretização da totalidade da fronteira da bacia portuária.

Os resultados apresentados nesta comunicação foram obtidos utilizando o potencial da onda incidente na posição ocupada pelo navio fornecido pelo modelo DREAMS e o potencial do problema de radiação fornecido pelo modelo WAMIT. Verificou-se que existe uma grande concordância nos resultados e que é maior para os períodos altos como seria de esperar, no caso mais simples. No segundo teste, em que existe uma parede próxima ao navio os resultados não foram tão concordantes, no entanto os valores parecem seguir o mesmo andamento geral e estão dentro da mesma ordem de grandeza.

Estes resultados são bastante promissores e ilustram as potencialidades da abordagem proposta. Pretende-se, com desenvolvimentos futuros, substituir o modelo de propagação de ondas por um mais complexo do tipo Boussinesq e usar os resultados para simular no domínio do tempo os movimentos de navios amarrados no interior de portos.

REFERÊNCIAS

- 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, 1957. (existe tradução na língua inglesa: David Taylor Model Basin Translation N.º.307, March 1962).
- Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Slavounos P.D. (1988) The analysis of wave effects on tension-leg platforms, *7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, pp. 1-14.
- Oortmerssen, G. (1976) The motions of a moored ship in waves. *Neth. Ship Model Basin* 510, 138.
- Sawaragi, T., Aoki, S., Hamamoto, S. (1989) Analyses of hydrodynamic forces due to waves acting on a ship in a harbour of arbitrary geometry. In: *Proceedings. 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 2, 117-123.
- Sawaragi, T., Kubo, M. (1982) The motions of a moored ship in a harbour basin. In: *Proc. 18th International Conference of Coastal Engineering ASCE*. pp. 2743-2762.
- Takagi, K., Naito, S., Hirota, K. (1993) Hydrodynamic forces acting on a floating body in a harbour of arbitrary geometry. *Proc. 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference III*, 192-199.
- Tuck E.O., Ship motions in shallow water, *Journal of Ship Research*, 14, 317-328, 1970.