



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE NA INTERAÇÃO ENTRE DOIS NAVIOS

Francisco, PEDRO¹; João A., SANTOS², Liliana V., PINHEIRO³, Conceição J.E.M., FORTES⁴, Miguel, HINOSTROZA⁵

¹ Eng. Civil, LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, fpedro@lnec.pt

² Eng. Civil, ISEL, Rua do Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007, Lisboa, jasantos@dec.isel.ipl.pt
CENTEC, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa

³ Eng. Civil, LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, lpinheiro@lnec.pt

⁴ Eng. Civil, LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt

⁵ Eng. Naval, CENTEC, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Miguel.hinostroza@centec.tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Nesta comunicação analisa-se a influência da variação da profundidade na interação hidrodinâmica entre dois navios, um estacionário e outro navegando na vizinhança, com recurso à modelação física e numérica. O navio em movimento é um modelo autopropulsionado à escala do navio de transporte de produtos químicos “Aurora”, sendo o navio estacionário um modelo à escala do navio tanque “Esso Osaka”. Foram realizados testes para várias velocidades do “Aurora” e para diferentes profundidades. Através dos dados obtidos foi feita a caracterização das ondas de esteira geradas pelo “Aurora” e dos movimentos induzidos no “Esso Osaka”. Estes movimentos foram comparados com os resultados obtidos com o pacote numérico SWAMS, que simula os movimentos de um navio (amarrado ou livre) sujeito à ação de ondas, ventos e correntes. As séries temporais das ondas de esteira geradas pelo “Aurora” foram utilizadas para definir as ondas incidentes no pacote numérico SWAMS. Analisou-se a influência da profundidade da água nos movimentos do navio, para os resultados físicos e numéricos.

Palavras-chave: Ondas de esteira, Modelo físico, Modelo numérico, Interação navio-navio, Movimentos de navios.

Tema: Mar, zonas costeiras e obras marítimas



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

Froude (1877) identificou a existência de dois sistemas de onda no campo de ondas gerado por um navio que se desloca em ao longo de uma linha reta: as ondas transversais e as ondas divergentes. As linhas de igual fase desses dois sistemas encontram-se ao longo de duas retas, simétricas em relação à trajetória do navio, ocorrendo os máximos da elevação da superfície livre ao longo dessas linhas.

O padrão teórico das ondas geradas por uma fonte pontual que se desloca com velocidade constante obtido por Lord Kelvin (1887) é muito semelhante ao padrão das ondas de esteira. Naquele trabalho, mostra-se que, em águas profundas, o máximo da elevação da superfície livre ocorre ao longo de duas linhas retas simétricas em relação à trajetória do navio, que partem da proa do navio e fazem um ângulo de $38^{\circ} 56'$ entre si ($19^{\circ} 28'$ com o eixo do navio).

Para compreender as propriedades físicas das ondas geradas por navios que se deslocam com velocidades críticas e supercríticas, a *Maritime and Coastguard Agency* - MCA (1998) realizou testes com diferentes modelos de navios num tanque de ensaios. Os modelos eram rebocados com velocidade constante através de uma região de profundidade também constante. Foram considerados diversos valores de velocidade e de profundidade, onde resultaram medições de altura e padrões de onda numa gama de números de Froude com base na profundidade entre 0.80 e 2.60. A análise da taxa de decaimento da altura máxima da onda máxima e a influência da profundidade nesse decaimento confirmaram os resultados de Havelock (1908) sobre o decaimento das ondas de esteira com a distância à fonte das mesmas.

Esta comunicação tem como objetivo investigar a capacidade dos modelos incluídos no pacote numérico para o comportamento do navio amarrado, SWAMS (Pinheiro *et al.*, 2013) para simular o comportamento desses navios sujeitos às ondas de esteira. Para tal, recorre-se a ensaios com modelo físico reduzido em que um modelo de navio navega com velocidade constante ao longo de uma trajetória retilínea a distância constante de um navio que de outra forma estaria imóvel. Analisam-se os movimentos deste navio sob a ação das ondas de esteira geradas pelo outro.

Os ensaios foram realizados num dos tanques de ondas do Laboratório de Engenharia Civil (LNEC). O navio em movimento é um modelo autopropulsionado à escala do navio de transporte de produtos químicos "Aurora" enquanto o navio imóvel é um modelo à escala do navio tanque "Esso Osaka".

Após esta introdução, apresentam-se os ensaios realizados com o modelo "Aurora" em movimento e o modelo de navio "Esso Osaka" imóvel. Depois, descrevem-se as principais características do pacote numérico SWAMS, bem como dos modelos numéricos que o integram. Os resultados dos ensaios com os modelos de navios são utilizados no capítulo seguinte para avaliar as capacidades dos modelos numéricos.

2. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

2.1. Equipamento e técnicas de medição

O objetivo principal dos ensaios foi caracterizar as ondas de esteira produzidas pelo movimento do “Aurora”, bem como os movimentos induzidos no modelo “Esso Osaka”, que de outra forma estaria parado nas imediações da trajetória seguida pelo “Aurora”.

Os ensaios foram realizados no tanque 6 do Pavilhão de Hidráulica Marítima do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do LNEC, Figura 1, com dimensões aproximadas de 23 m x 22 m (comprimento x largura).

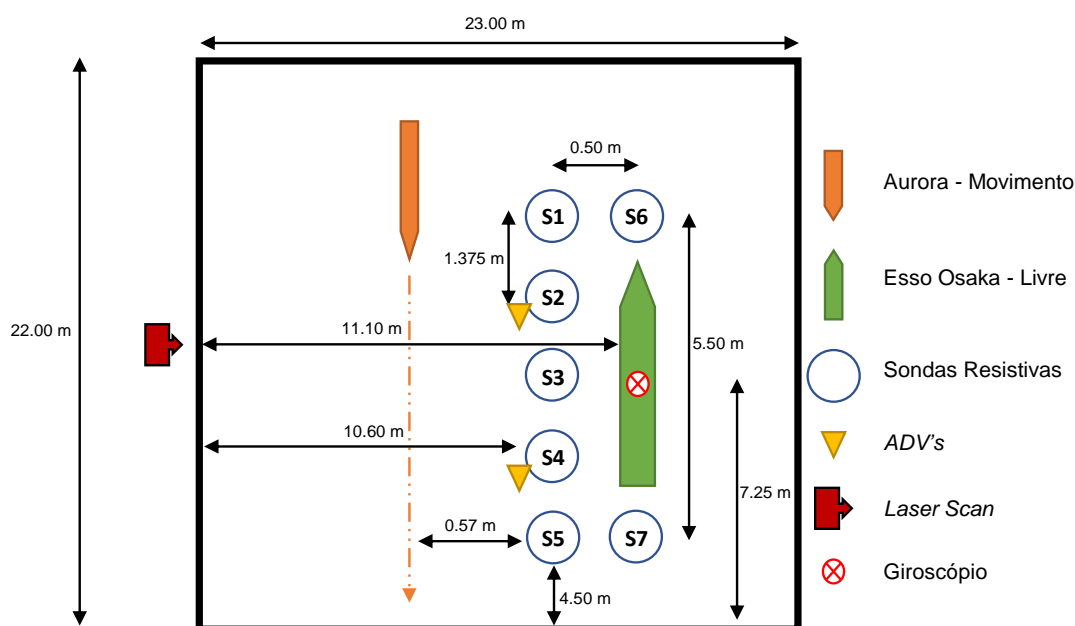


Figura 1. Instalação experimental: Esquema do posicionamento dos navios e do equipamento

Para realização dos ensaios foram utilizados, além dos 2 modelos de navios (“Aurora” e “Esso Osaka”): 7 sondas resistivas, 2 velocímetros acústicos (ADV), um giroscópio, um *laser scan* e uma GoPro.

O modelo “Esso Osaka” foi colocado na posição $x = 11.10$ m com a proa perpendicular ao maior lado do tanque. As 7 sondas resistivas e os 2 velocímetros acústicos (ADV’s) foram dispostos de acordo com a Figura 1. O modelo “Aurora” efetuou viagens ao longo do menor comprimento do tanque com diferentes velocidades a uma distância pretendida das sondas de 0.57 m (isto é, com uma distância entre os eixos longitudinais dos modelos de navios de 1.07 m).

Para medir as velocidades do escoamento associado às ondas geradas pelo “Aurora” foram utilizados dois velocímetros acústicos – *Acoustic Doppler Velocimeter*. Estes permitem medir as componentes da velocidade segundo os 3 eixos (x, y e z) a 6 cm da superfície livre, com uma frequência de aquisição de 25 Hz. Os velocímetros foram colocados nas posições indicadas na Figura 1, colocados junto às sondas S2 e S4, como mostrado na Figura 2.



Figura 2. Esq.) Modelo do navio “Esso Osaka”, sondas resistivas e ADV's; Drt.) Modelo do navio “Aurora”

O giroscópio de fibra ótica instalado no “Esso Osaka” mede o rumo do navio bem como as acelerações segundo os movimentos de avanço (*surge*), deriva (*sway*), abatimento (*heave*), balanço (*roll*), cabeceio (*pitch*) e guinada (*yaw*). A partir dessas acelerações pode estimar-se as velocidades dos movimentos segundo os mesmos modos. Este equipamento foi colocado no navio numa posição tão próxima quanto possível do centro de gravidade do navio, nomeadamente no que se refere aos eixos longitudinal e transversal. Para gerir a sincronização da aquisição e armazenamento de dados do giroscópio foi criado um conjunto de programas em LABVIEW (Hinostroza & Guedes, 2016). Embora a frequência de aquisição de dados do giroscópio varie com o movimento, o pós-processamento dos valores obtidos permite a utilização de valores de aceleração igualmente espaçados a que corresponde uma frequência de 25 Hz.

O laser scan foi colocado perpendicularmente ao modelo “Esso Osaka” do lado de fora do tanque. O objetivo era não só medir a distância entre o “Esso Osaka” e a trajetória do “Aurora”, mas também estimar a velocidade com que o “Aurora” passava frente ao “Esso Osaka”. A câmara GoPro foi colocada também do lado de fora para filmar todas as experiências realizadas.

2.2. Condições de Ensaio

O modelo “Esso Osaka” é um modelo à escala geométrica de 1:100 do casco do navio tanque homónimo e tem um comprimento total de 3.45 m, uma boca de 0.54 m e um calado máximo de 0.23 m.

O modelo “Aurora” é um modelo à escala geométrica de 1:65.7 do casco do navio de transporte de produtos químicos homónimo e tem um comprimento de 2.59 m, uma boca de 0.43 m e um calado máximo de 0.11 m.

Importa referir que nestas experiências não se pretendeu reproduzir o comportamento de navios existentes – daí os modelos utilizados não serem a reprodução na mesma escala geométrica de navios reais – mas apenas caracterizar as ondas de esteira geradas pelo movimento de um modelo de navio e os movimentos por elas induzidos noutro modelo de



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

navio, que de outra forma estaria imóvel. De igual forma, a distribuição de massas nos modelos de navios empregues não procurou reproduzir as inércias de navios reais, mas apenas os calados que levam aos números de Froude e às relações profundidade/calado selecionados.

O peso do casco do “Esso Osaka” vazio (apenas o casco) obtido numa balança digital foi 56.06 kgf. O peso do giroscópio colocado no “Esso Osaka” para registar as acelerações lineares e angulares do navio é 5.44 kgf. Para simular uma condição de carga intermédia, foram colocados 8 blocos cúbicos de betão no interior do casco do navio com um peso total de 152.65 kgf. Isto perfaz um peso total do modelo (navio + blocos + equipamento) de 214.15 kgf.

O “Aurora” é um modelo autopropulsionado, dispondo de motor, leme e giroscópio que lhe permitem navegar ao longo de um rumo selecionado com a velocidade desejada. A propulsão do “Aurora” (Perera *et al.* 2015) é fornecida por um motor elétrico DC com a potência de 22 W sendo capaz de uma velocidade de avanço máxima de 2.0 ms^{-1} , quando navegando em grandes profundidades com um calado de 0.11 m. Para a condição de carga testada tinha-se um peso total (navio + equipamento + carga) de 83.78 kgf, que corresponde a um calado de 0.105 m e um deslocamento de $83.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Cada teste consistiu nas seguintes etapas:

- a) Ajuste do nível de água no tanque;
- b) Colocação de blocos, pesos e equipamento em cada um dos navios;
- c) Ligação e/ou colocação dos equipamentos para medição da elevação da superfície livre e velocidades;
- d) Calibração das sondas resistivas;
- e) Realização da viagem do navio “Aurora” ao longo de uma trajetória retilínea e com uma potência de motor pré-definida.

Todas as viagens começavam com o “Aurora” parado com o seu eixo longitudinal afastado 0.57 m do alinhamento das sondas S1 a S5 e terminavam quando o navio atingia a parede do tanque (a cerca de 4 m da sonda S5).

Atendendo ao ângulo entre a trajetória do navio e a linha de máximo da altura das ondas geradas pelo movimento do “Aurora” ($19^\circ 28'$, implica um valor de F_s inferior a 0.7) não é difícil concluir que, para se obterem medições com significado das ondas geradas pelo “Aurora” em todas as sondas, a distância máxima entre este navio e o alinhamento das sondas não deve ultrapassar 1.60 m.

Nestes testes consideraram-se três frações da potência máxima do motor (0.90; 0.80 e 0.70) e três profundidades (0.820 m, 0.340 m e 0.255 m). Para cada condição de teste (profundidade e fração da potência máxima) foram realizadas até 10 repetições. No total, nesta experiência realizaram-se 48 testes.

A primeira profundidade corresponde a uma situação de grande profundidade para os dois modelos de navio pois é maior que 4.2 vezes o calado de qualquer dos modelos, isto é, o escoamento em torno do casco não é influenciado pela proximidade do fundo. As outras duas profundidades correspondem à situação de profundidade intermédia. Um exemplo de águas profundas é apresentado na Figura 3, correspondente à série temporal da elevação da

superfície livre medida na sonda S3 durante o teste T07 (potência = 0.90 da potência máxima do motor; profundidade = 0.82 m e distância entre modelos de navio = 0.93 m) enquanto um exemplo de uma situação de profundidades intermédias é apresentado na Figura 4 correspondente à série temporal da elevação da superfície livre medida na sonda S3 durante o teste T15 (potência = 0.80 da potência máxima do motor; profundidade = 0.34 m e distância entre modelos de navio = 0.34 m. De fato, a depressão nesta figura, entre o instante $t=10$ s e $t=13$ s, corresponde à passagem do modelo do navio pela sonda S3 e é devido à diminuição da pressão associada ao escoamento entre a quilha e o fundo do tanque.

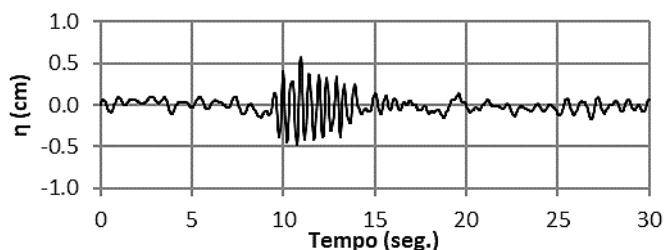


Figura 3. Série temporal da elevação da superfície livre medida na sonda S3 durante o teste T07 (potência do motor = 0.90 x potência máxima do motor, profundidade = 0.82 m e distância de passagem entre navios 0.93 m)

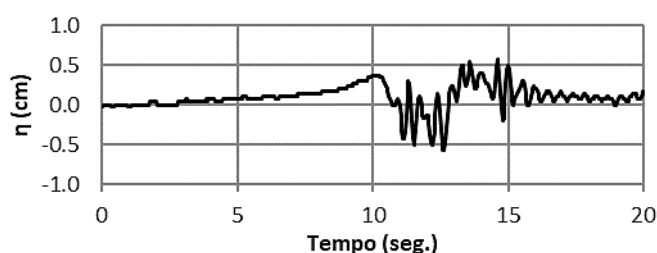


Figura 4. Série temporal da elevação da superfície livre medida na sonda S3 durante o teste T15 (potência do motor = 0.80 x potência máxima do motor, profundidade = 0.34 m e distância de passagem entre navios 0.34 m)

Idealmente, os sistemas de controlo do modelo do navio “Aurora” deveriam assegurar repetições de viagem quase iguais. Contudo, ligeiras variações no rumo inicial ou no posicionamento inicial do modelo tornam-no praticamente impossível. A distância entre navios observada (isto é, medida com o *laser scan*) varia de 0.34 m até 2.30 m. Tais valores extremos podem não ser devidos apenas ao desvio do “Aurora” da sua trajetória, mas também à deriva do “Esso Osaka” provocada pelas ondas de esteira ou às oscilações no interior do tanque, uma vez que o “Esso Osaka” foi seguro na sua posição por elásticos de baixa rigidez.

A velocidade do “Aurora” foi estimada a partir do quociente entre o comprimento deste modelo de navio e o tempo que este leva a passar à frente do *laser scan*. Contudo dificilmente se pode considerar constante a velocidade do “Aurora” quando passa em frente ao “Esso Osaka”. Além disso, são poucos os testes onde a velocidade do “Aurora”, obtida a partir da velocidade da propagação das ondas de esteira, entre sondas consecutivas iguala a velocidade estimada pelo *laser scan*. De novo, o desvio em relação à trajetória pretendida pode ser a causa desta diferença.

3. INTERAÇÃO ONDA-NAVIO

Se os movimentos do navio forem pequenos o suficiente, a interação entre o navio livre e as ondas incidentes pode ser considerada linear. Consequentemente, pode decompor-se esta interação em dois problemas mais simples: o problema de difração, onde o navio é mantido imóvel sujeito às ondas incidentes; e o problema de radiação, onde se movimenta o navio em águas de outro modo paradas, de tal forma que as forças atuantes no navio igualem as outras forças no navio (inércia e difração).

A equação de movimento para cada grau de liberdade X_k é dada por:

$$\sum_{j=1}^6 \left[(M_{kj} + m_{kj}) \ddot{X}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t - \tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + C_{kj} X_j \right] = F_k^D + F_k^{ext} \quad (1)$$

onde M e C são, respetivamente, as matrizes de massa e de restituição hidrostática do navio, que dependem apenas da distribuição de massa no navio e do formato do casco. m e K são, respetivamente, as matrizes de massa adicionada e das funções de atraso. Estas matrizes estão associadas ao problema de radiação, sendo m_{kj} a força ao longo do grau de liberdade X_k devida à aceleração unitária do navio ao longo da coordenada X_j ($\ddot{X}_j = 1$) e $K_{kj}(\tau)$ sendo a série temporal da força segundo o grau de liberdade X_k devida a uma velocidade impulsiva ao longo do grau de liberdade X_j no instante $t = 0$ ($\dot{X}_j(t) = \delta(0)$). F_k^D é a série temporal da força de difração segundo o grau de liberdade X_k enquanto F_k^{ext} representa a série temporal das restantes forças exteriores segundo o mesmo grau de liberdade.

O pacote numérico SWAMS, Pinheiro *et al.* (2013), é o resultado da acoplagem de modelos numéricos para a propagação de ondas com modelos numéricos para o comportamento de navios amarrados, permitindo assim a identificação de estados de mar adversos e o melhor planeamento das atividades portuárias.

Para simular o comportamento dos navios amarrados o SWAMS recorre ao modelo numérico BAS (Mynett *et al.*, 1985) que resolve as equações de movimento de um navio amarrado, considerando diversas origens para as forças exteriores. O modelo leva em conta as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos de amarração e defensas) e as forças devidas ao vento e correntes, bem como forças não lineares de deriva e de amortecimento, não consideradas nos modelos numéricos lineares utilizados na caracterização da interação dos navios com as ondas incidentes. Este modelo numérico fornece, sob forma de série temporal, movimentos do centro de gravidade do navio segundo os seis graus de liberdade, forças de tração nos cabos de amarração e forças de compressão nas defensas. O *input* fundamental para este modelo numérico é a série temporal das forças externas. Conhecida essa série para as ondas de esteira seria possível obter os movimentos do navio amarrado (ou livre) sujeito a essas ondas.

3.1. Abordagem no domínio da frequência

Para um navio livre sujeito a ondas monocromáticas de frequência ω , tal que a elevação da superfície livre num ponto possa ser dada por $\eta(t) = \zeta_0 \cos(\omega t)$, as forças de difração podem ser escritas como $F_k^D(t) = \zeta_0 F_k^D(\omega) \cos(\omega t + \varphi_k)$ e o movimento do navio para cada grau de

liberdade X_j será sinusoidal com uma frequência ω , $X_j = \zeta_j \cos(\omega t + \alpha_j)$. Então, as equações do movimento são dadas por:

$$\sum_{j=1}^6 \{ -\omega^2 [M_{kj} + a_{kj}(\omega)] \zeta_j \cos(\omega t + \alpha_j) + b_{kj}(\omega) \zeta_j \omega \sin(\omega t + \alpha_j) + C_{kj} \zeta_j \cos(\omega t + \alpha_j) \} = \zeta_0 F_k^D(\omega) \cos(\omega t + \varphi_k(\omega)) \quad (2)$$

onde $a_{kj}(\omega)$ e $b_{kj}(\omega)$ são as componentes da força de radiação em fase com a aceleração e velocidade, respetivamente, isto é, os chamados coeficientes de massa adicionada

$$a_{kj}(\omega) = m_{kj} - \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{kj}(\tau) \sin(\omega \tau) d\tau \quad (3)$$

e de amortecimento

$$b_{kj}(\omega) = \frac{1}{\omega} \int_0^\infty K_{kj}(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau \quad (4)$$

Isto significa que é possível utilizar-se os resultados de modelos numéricos para a interação navio – ondas, no domínio da frequência, para obter as matrizes de massas adicionadas, m , e das funções de atraso, K .

O modelo WAMIT, Korsemeyer *et al.* (1988) é um desses modelos. Utiliza um método de painéis (isto é, a superfície submersa do casco é discretizada com por painéis retangulares ou triangulares) para resolver as equações integrais para a intensidade das fontes e dipolos distribuídos nesses painéis e com os quais é possível gerar os potências harmónicos dos escoamentos associados aos problemas de radiação e de difração de um navio livre colocado numa zona de profundidade constante mas não limitada. Trata-se de escoamentos irrotacionais de fluidos perfeitos, isto é, não é considerada viscosidade. Da resolução destes problemas é possível determinar os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento ($a_{kj}(\omega)$ e $b_{kj}(\omega)$), bem como as amplitudes e a fase das forças de difração ($F_k^D(\omega)$ e $\varphi_k(\omega)$) para ondas incidentes de amplitude unitária ($\zeta_0=1$). O modelo WAMIT apenas determina as forças de difração provocadas por ondas de crista retilínea.

O número de frequências consideradas condiciona a qualidade das estimativas das matrizes de massa adicionada e de função de atraso. O número de painéis por comprimento de onda influencia a solução do problema de radiação e de difração no domínio da frequência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro conjunto de comparações entre o modelo numérico e os resultados dos ensaios em modelo físico não envolve ondas. Nele tenta realizar-se uma afinação dos parâmetros correspondentes à distribuição de massas no modelo do navio “Esso Osaka”, em especial das inércias associadas ao rolo e ao cabeceio, bem como avaliar a necessidade de incluir uma força de amortecimento viscoso na simulação no domínio temporal. Para tal recorre-se aos resultados obtidos nos testes de decaimento do modelo “Esso Osaka”.

Estes testes foram realizados em águas paradas, com uma profundidade de 0.474 m, e consistiram em impor um ângulo inicial para o rolo e para o cabeceio e registar a série temporal dos movimentos resultantes.

A primeira estimativa para o valor do raio de giração, r_x , (distância ao eixo X onde se pode assumir que a massa do navio é concentrada) obteve-se assumindo uma distribuição de

massas uniforme no volume correspondente ao casco submerso do navio, tendo-se obtido $r_x = 0.105$ m. Como expectável, o movimento de rolo previsto com o modelo numérico BAS não coincidiu com o movimento de rolo medido nos testes de decaimento. Utilizando, por exemplo, um ângulo inicial de rolo de 11.58° , Figura 5, o período das oscilações na série temporal do rolo obtida com o modelo numérico é menor que o medido nos testes de decaimento, o que implica que o raio de giração tenha de ser aumentado. Por tentativa e erro, obteve-se para o raio de giração do rolo $r_x = 0.1705$ m (isto é, uma inércia de 6.897×10^{-3} kg.m² segundo o eixo X).

É importante referir que a geração de ondas pelo movimento de rolo é a responsável pelo decaimento observado na série temporal do movimento do rolo (Figura 5). De fato, pode verificar-se na Figura 5 que o decaimento previsto para o movimento de rolo aproxima-se bastante do medido, não havendo necessidade de levar em conta o fator de amortecimento viscoso do rolo (b_{4visc}),

$$F_4^{visc} = -b_{4visc} \dot{X}_4 \quad (5)$$

considerado no modelo BAS para fazer face ao momento viscoso associado ao rolo.

Utilizando a mesma abordagem para o teste de decaimento do cabeceio, conclui-se que um raio de giração, $r_y = 0.7947$ m (isto é, uma inércia de 149.829×10^{-3} kg.m² segundo o eixo Y) apresenta uma boa concordância entre o período natural de decaimento do cabeceio estimado pelo modelo numérico e o medido no teste de decaimento (Figura 6). De novo, não há necessidade de adicionar um fator de amortecimento viscoso do cabeceio (b_{5visc}).

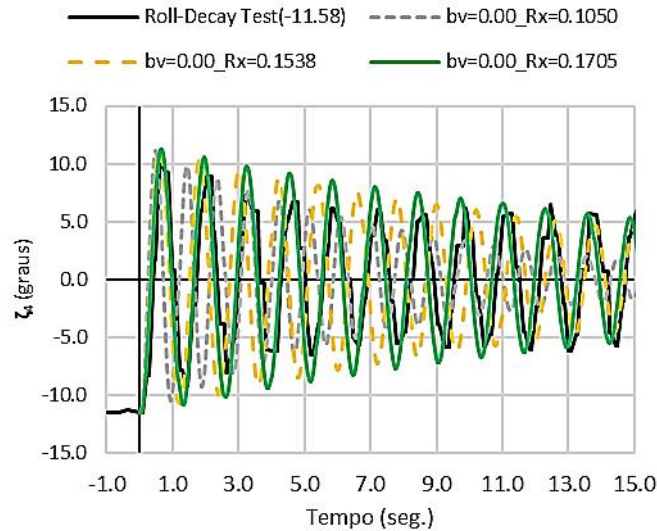


Figura 5. Série temporal do teste de decaimento do rolo do navio “Esso Osaka”. Rolo inicial de -11.58° . Comparação entre medições e previsões do modelo numérico.

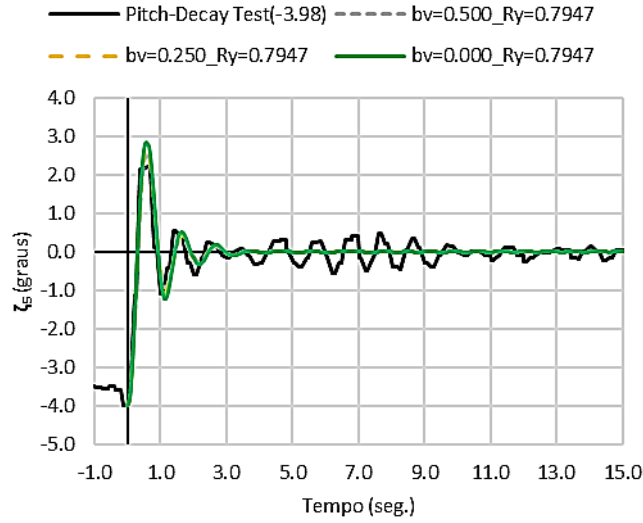


Figura 6. Série temporal do teste de decaimento da arfagem do navio “Esso Osaka”. Arfagem inicial de -11.58° . Comparação entre medições e previsões do modelo numérico.

$$F_5^{visc} = -b_{5visc} \dot{X}_5 |\dot{X}_5| \quad (6)$$

As simulações numéricas feitas com recurso ao modelo BAS foram realizadas com funções de atraso obtidas a partir da transformada discreta de Fourier dos coeficientes de amortecimento obtidos com o modelo WAMIT para frequências entre 0.20 Hz e 18.00 Hz, igualmente espaçadas de 0.20 Hz e utilizando 3803 painéis para discretizar o casco submerso do navio.

Como primeira abordagem, as ondas de esteira foram consideradas como sendo de crista rectilínea longa e com a elevação da superfície livre medida na sonda resistiva S1. Também se assumiu que as cristas dessas ondas se propagavam com o ângulo de 20° em relação ao eixo longitudinal do “Esso Osaka” (isto é, um ângulo de 110° entre o eixo longitudinal do “Esso Osaka” e o vetor número de onda).

Apesar de ser uma abordagem bastante simplificada, esta tem a vantagem de permitir a utilização das funções de transferência (ou *Response Amplitude Operators*, RAO's), obtidas diretamente dos resultados do modelo WAMIT no domínio da frequência:

$$RAO_k(\omega) = \frac{\zeta_k(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (7)$$

$RAO_k(\omega)$ é o quociente entre a amplitude da resposta, $\zeta_k(\omega)$, e a amplitude da excitação, $\zeta_0(\omega)$, para uma dada frequência, ω . Estas funções são calculadas pelo modelo WAMIT para ondas de crista longa que fazem um determinado ângulo com o eixo longitudinal do navio (neste caso o modelo do navio “Esso Osaka”). Isto significa que, enquanto o ângulo entre a onda incidente e o navio não se alterar, a razão entre as amplitudes das componentes de resposta (que podem ser obtidas através da transformada de Fourier da serie temporal da resposta) e as amplitudes das componentes da elevação da superfície livre (que podem ser obtidas através da transformada de Fourier da serie temporal da elevação da superfície livre) devem coincidir com a curva do RAO do navio estacionário para esse ângulo de incidência de onda e profundidade.

Devido aos problemas encontrados nos ensaios em modelo físico com a repetibilidade das viagens do “Aurora”, Pedro *et al.* (2017), apenas alguns testes do total de 48 testes realizados foram analisados nesta comunicação. Na Tabela 1 apresentam-se os 9 testes selecionados, que incluem 3 repetições para cada profundidade ensaiada (0.82 m; 0.34 m; 0.255 m). Em todos os testes a potência do motor, P_E , foi fixada nos 90% da potência máxima.

Na Figura 7 e na Figura 8 apresentam-se os RAO 's para os movimentos de rolo e cabeceio, respetivamente, para as três profundidades.

Tabela 1. Testes selecionados para análise. $P_E=90\%P_{E_{max}}$

Teste	Profundidade (m)	Distância de passagem (m)	Velocidade de avanço (m/s)
T03	0.82	1.04	0.83
T08	0.82	0.93	0.86
T09	0.82	1.16	0.83
T12	0.34	1.00	0.83
T24	0.34	0.86	0.87
T27	0.34	0.96	0.87
T34	0.255	1.01	0.85
T35	0.255	0.85	0.88
T46	0.255	1.00	0.82

As figuras mostram que para as componentes de baixa frequência, à medida que a profundidade diminui há um aumento da amplitude de resposta. O oposto ocorre para as componentes de alta frequência.

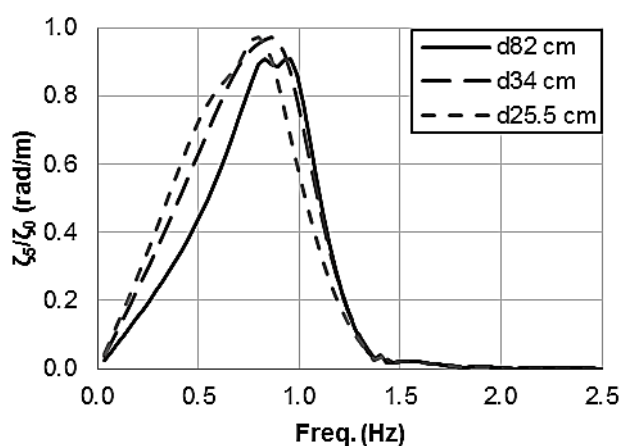


Figura 7. RAO s para, os movimentos de rolo do "Esso Osaka" para as três profundidades de água ensaiadas

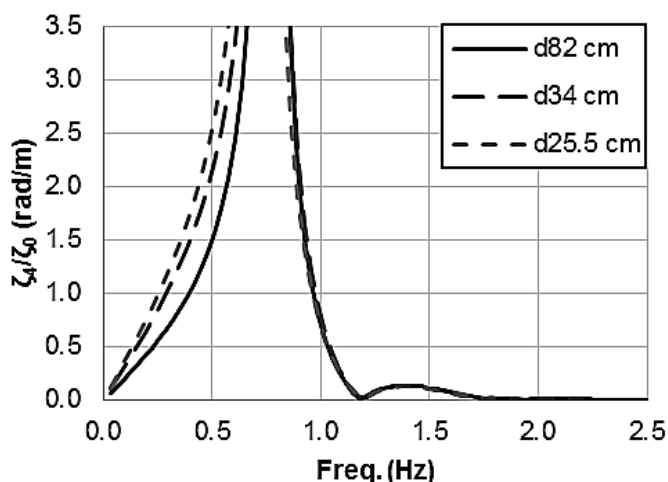


Figura 8. RAOs para, os movimentos de cabeceio do "Esso Osaka" para as três profundidades de água ensaiadas

A Figura 9 apresenta o espectro de amplitudes da elevação da superfície livre (sonda S1), do movimento de rolo e de cabeceio, para o teste T08. Apenas os 10 maiores picos do espectro de amplitudes da elevação da superfície livre foram utilizados para calcular os *RAO's*, a fim de se evitar valores muito pequenos que poderiam amplificar os valores dos *RAO's*, o que pode não corresponder exatamente ao fenómeno físico.

Na Figura 10 apresentam-se os *RAO's* para o movimento de rolo estimados com este procedimento, para as três profundidades, enquanto na Figura 11 se apresentam os *RAO's* para o movimento de cabeceio.

O movimento de rolo é altamente amplificado para frequências próximas dos 0.75 HZ. Contudo, todas as ondas de esteira geradas nestes testes têm frequências mais altas, para as quais os *RAO's* resultantes são muito pequenos e, como se pode verificar na Figura 10, há uma boa concordância entre os resultados do modelo físico e dos numéricos. Além disso, uma parte significativa do espectro de energia das ondas incidentes no modelo "Esso Osaka" está na gama das baixas frequências, o que indica uma possível existência de ondas longas no tanque. Os *RAO's* dessas ondas longas são também bem simuladas pelo modelo numérico. O aumento da magnitude do *RAO* em torno dos 0.60 HZ é também visível nos valores do *RAO* obtidos a partir das medições dos ensaios em modelo físico.

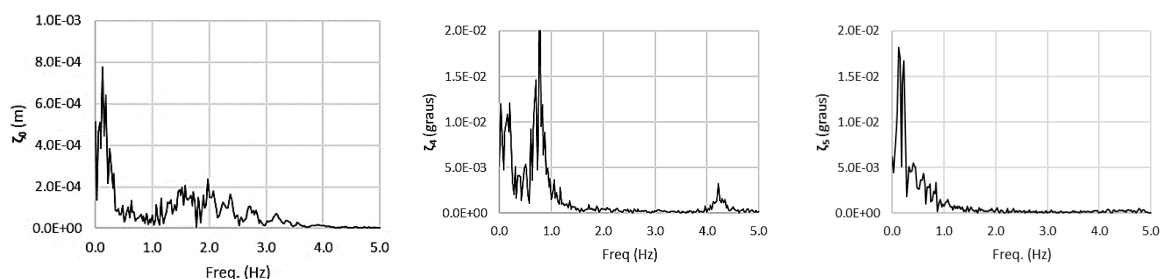


Figura 9. Espectro de amplitudes do teste T08: Esq. - Elevação da superfície livre medida na sonda S1; Centro - Movimento de rolo; Dir. - Movimento de cabeceio

No que diz respeito aos *RAO's* do movimento de cabeceio, Figura 11, parece existir uma subestimação dos resultados experimentais por parte do modelo numérico. Os valores do

RAO obtidos a partir dos ensaios mostram uma grande dispersão, evidenciando a dificuldade de reproduzir as características testadas. Tal deve-se, principalmente, à dificuldade em manter a rota do navio. Mesmo assim a maior diferença ocorre na gama das baixas frequências. Para a gama de frequências das ondas de esteira (1.5 Hz a 2.5 Hz) os resultados são bastante similares.

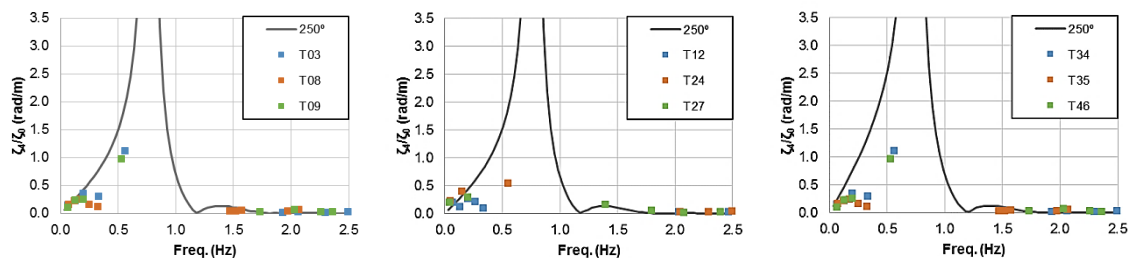


Figura 10. RAO's para o movimento de rolo para profundidades de: Esq. 82 cm; Centro 34 cm; Dir. 25.5 cm

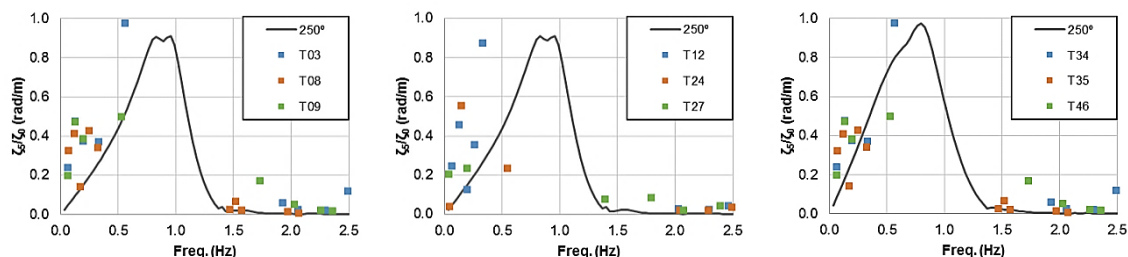


Figura 11. RAO's para o movimento de cabeceio para profundidades de: Esq. 82 cm; Centro 34 cm; Dir. 25.5 cm

5. CONCLUSÕES

A interação hidrodinâmica entre dois navios, um estacionário e outro em movimento, foi analisada utilizando modelos físicos e numéricos.

Os dados obtidos foram analisados no que diz respeito à caracterização das ondas de esteira geradas e dos movimentos induzidos no navio estacionário, utilizando os respetivos RAO's. Todos os testes analisados nesta comunicação tinham uma velocidade de avanço de aproximadamente 0.85 m/s. Foram simuladas 3 profundidades diferentes.

A análise da influência da profundidade nos movimentos do navio mostrou que, para as componentes de baixa frequência, à medida que a profundidade diminui, há um aumento na amplitude de resposta, e para as componentes de alta frequência, à medida que a profundidade diminui a amplitude de resposta também diminui. Contudo, os RAO's para as frequências altas são muito pequenos. Isto é devido ao valor baixo do quociente entre o comprimento de onda e o comprimento do navio. Como o navio de outra forma parado é um grande petroleiro, pequenos comprimentos de onda, tais como os das ondas de esteira do navio têm um pequeno impacto. Pelo contrário, grandes comprimentos de onda podem produzir movimentos significativos no navio. Apesar de não intencional, ondas longas estavam presentes no tanque onde se realizaram os ensaios em modelo físico, e por isso a sua influência no navio foi notada. A comparação dos RAO's na gama das baixas frequências mostrou que o RAO's também foi bem reproduzido pelo modelo numérico.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FCT, através do projeto “*M&M Ships - Manoeuvring & Moored Ships in Ports. Physical and numerical modelling.*” PTDC/EMS-TRA/5628/2014, bem como do Instituto Politécnico de Lisboa através do projeto IPL/2016/NavNum_ISEL “Ondas geradas por navios – modelação numérica do escoamento em torno do casco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Froude, W. 1877. Experiments upon the effect produced on the wave-making resistance of ships by length of parallel middle body. Trans. Inst. of Naval Architects, vol.18, pp.77-87.

Havelock, T.H. 1908. The propagation of groups of waves in dispersive media, with application to waves on water produced by a travelling disturbance. Proc. Royal Society A, vol.81, n.º549, pp. 398-430.

Hinostroza, M. A., Guedes Soares, C. 2016. Parametric estimation of the directional wave spectrum from ship motions. Int. J. Marit. Eng, vol. 158, pp. A 121-A-130.

Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Sclavounos 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.

Lord Kelvin (Sir William Thomson). 1887. On ship waves. Proc. Inst. Mech. Engineers, pp. 409-433.

Maritime Coastguard Agency (MCA) 1998. Research Project 420 – Investigation of High-speed Craft on Routes near to Land or Enclosed Estuaries. Final Report.

Mynett, A.E., Keunig, P.J., Vis, F.C. 1985. The dynamic behaviour of moored ships inside a harbour configuration. Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.

Pedro, F., Santos, J.A., Hinostroza, M., Pinheiro, L.V., Fortes, C.J.E.M. 2017. Experimental characterization of ship motions induced by passing ships. International Short Course and Conference on Applied Coastal Research (SCACR2017), IH Cantabria, Santander, Spain.

Perera, L. P., Ferrari, V., Santos, F. P., Hinostroza, M. A., Soares, C. G. 2015. Experimental evaluations on ship autonomous navigation and collision avoidance by intelligent guidance. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 40(2), 374-387.

Pinheiro, L. V.; Fortes, C. J.E.M.; Santos, J. A.; Fernandes, J. L.M. 2013. Numerical simulation of the behaviour of a moored ship inside an open coast harbour. V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2013. B. Brinkmann and P. Wriggers (Eds).