

## MODELAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA DA INTERAÇÃO HIDRODINÂMICA ENTRE DOIS NAVIOS

Francisco Pedro<sup>1</sup>· Liliana Pinheiro<sup>1</sup>· João Alfredo Santos<sup>2,3</sup>,  
Conceição J.E.M. Fortes<sup>1</sup>· Miguel Hinostroza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Emails: fpedro@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

<sup>2</sup>ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
Emails: jasantos@dec.isel.ipl.pt

<sup>3</sup>CENTEC - Centre of Marine Technology and Ocean Engineering  
Emails: miguel.hinostroza@centec.tecnico.ulisboa.pt

### RESUMO

Nesta comunicação, analisa-se, recorrendo à modelação física e à modelação numérica, a interação hidrodinâmica entre dois navios, um dos quais parado, o navio “Esso Osaka”, e o outro em movimento, o navio “Aurora”. Os movimentos do navio parado são induzidos pela onda de esteira causada pelo outro navio que navega nas imediações daquele.

Foram realizados testes para várias velocidades do navio em movimento, o Aurora, e para diferentes níveis de água. Efetua-se uma análise dos resultados obtidos para as diferentes condições de teste, quer da agitação gerada, quer dos movimentos induzidos no “Esso Osaka”.

Relativamente à agitação gerada, as ondas de esteira, comparam-se os valores medidos com fórmulas empíricas da literatura.

Finalmente, os movimentos registados são analisados e comparados, para algumas condições de teste, com os obtidos numericamente, recorrendo ao pacote numérico para simulação do comportamento de navios amarrados, SWAMS. Avalia-se o desempenho deste pacote numérico.

### 1 INTRODUÇÃO

As ondas incidentes em navios parados/amarrados podem condicionar as operações de carga e descarga ou mesmo a segurança do sistema navio-amarras, com rotura dos elementos do sistema de amarração, da estrutura de acostagem ou do casco do navio. Essas ondas podem ter duas origens distintas: a agitação marítima vinda do exterior do porto ou a manobra de navios no interior do porto, as chamadas ondas de esteira.

Os ensaios em modelo físico de navios amarrados e em manobra podem fornecer informação relevante para a caracterização da resposta desses navios às ondas neles incidentes, algo de especial importância para a validação de modelos numéricos

capazes de simular a mesma interação. Por outro lado os modelos numéricos convenientemente validados e calibrados são uma ferramenta útil e de menor custo para a aplicação generalizada a múltiplas condições de teste.

Neste âmbito, foi realizado um conjunto de ensaios em modelo físico num dos tanques do Pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil do LNEC, com dois navios, um em movimento “Aurora”, e outro, “Esso Osaka” estacionado. O objetivo foi caracterizar o campo de ondas de esteira gerado pela viagem do modelo autopropulsionado “Aurora” ao longo de uma trajetória retilínea com velocidade constante, bem com os movimentos do navio “Esso Osaka” induzidos por aquelas ondas.

Foram realizados testes para várias velocidades do “Aurora” e para diferentes níveis de água. Para cada teste (velocidade e nível de água) mediu-se a elevação da superfície livre com um conjunto de sondas resistivas e a velocidade do escoamento induzido pela passagem do navio com um conjunto de ADVs. Os movimentos do navio Esso Osaka foram medidos segundo os seis graus de liberdade, com um giroscópio instalado no seu interior que regista as acelerações lineares e angulares permitindo obter movimentos e rotações instantâneos. Efetua-se uma análise dos resultados obtidos para as diferentes condições de teste, quer da agitação gerada, quer dos movimentos induzidos no Esso Osaka. Relativamente à agitação gerada, as ondas de esteira, comparam-se os valores medidos com fórmulas empíricas da literatura (PIANC 2003, PIANC 1995, Verhey & Bogaerts 1989).

Para uma das condições de teste, efetuou-se uma simulação com o pacote numérico para o comportamento de navios amarrados SWAMS (Pinheiro *et al.* 2013), com o objetivo de determinar numericamente os movimentos do Esso Osaka quando sujeito às ondas de esteira do Aurora. Estes resultados numéricos são comparados as medições em modelo físico, avaliando-se deste modo o desempenho deste pacote numérico.

Depois deste ponto de introdução, apresenta-se no ponto 2 os fundamentos teóricos da geração de ondas por embarcações em movimento que levaram às gamas de velocidades e distância entre navios a estudar consideradas nos testes. No ponto 3 descreve-se os equipamentos utilizados, bem como o procedimento de ensaio adotado, enquanto no ponto 4 se apresentam os valores obtidos nas medições realizadas e efetua-se uma análise comparativa para a diferentes condições de teste, quer das ondas de esteira geradas, quer dos movimentos induzidos no “Esso Osaka”. No ponto 5 descreve-se a aplicação do pacote numérico a uma das condições de teste e comparam-se os resultados numéricos com as medições. No ponto 6 são tecidas algumas considerações finais.

## **2 ONDAS GERADAS POR NAVIOS AVANÇANDO COM VELOCIDADE CONSTANTE**

No primeiro trabalho de caracterização das ondas geradas por navios viajando em linha reta, Froude (1877) identificou a existência de dois sistemas de ondas: as ondas transversais e as ondas divergentes (Figura 1). Linhas de igual fase desses dois sistemas encontram-se ao longo de duas linhas retas, simétricas em relação a trajetória seguida pelo navio. Os valores mais altos da elevação da superfície livre ocorrem ao longo dessas linhas, bem como na vizinhança imediata da proa do navio.

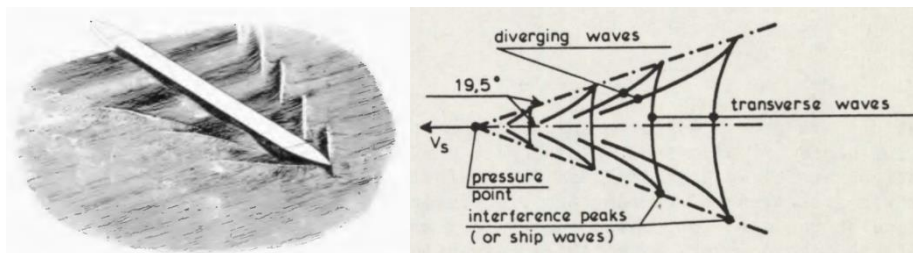


Figura 1. Sistema de ondas gerado por um navio (Froude 1877) e padrão de ondas de Kelvin (Verhey e Bogaerts, 1989)

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 gerado por um navio. 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).

O parâmetro essencial que determina o padrão gerado pelo navio que se desloca em linha reta é o número de Froude:

$$F_s = V_s / (gh)^{1/2}, \quad (1)$$

que compara a velocidade do navio,  $V_s$ , com a velocidade de pequenas perturbações em águas pouco profundas, sendo  $g$  a aceleração da gravidade e  $h$  a profundidade da zona onde o navio se desloca. Enquanto o número de Froude não ultrapassa 0.7 o ângulo entre as linhas de máximo e a trajetória do navio vai crescendo lentamente. O mesmo se passa com o espaçamento entre as ondas (comprimento de onda). Quando o número de Froude atinge a unidade, aquele ângulo é  $90^{\circ}$  e o padrão de ondas é apenas uma onda cuja crista é perpendicular à trajetória do navio. Para valores do número de Froude superiores a 1. o padrão de ondas muda completamente, desaparecendo as ondas transversais e ficando a zona perturbada pela passagem do navio contida entre duas linhas retas cujo ângulo com a trajetória do navio diminui com o aumento do número de Froude. Importa referir que aquelas linhas são agora apenas uma linha de fase do padrão de ondas e não o lugar geométrico das amplitudes máximas.

A Figura 2 mostra os padrões de ondas mencionados, bem como a correspondente série temporal da elevação da superfície livre medida num ponto fixo a alguma distância da trajetória do navio.

Para navios que se deslocam em grandes profundidades, isto é, com uma velocidade tal que o número de Froude é muito baixo, Havelock (1908) apresenta uma expressão para  $H_i$  a altura máxima da onda gerada pelo navio medida a uma distância  $s$  do bordo do navio

$$H_i / h = \alpha_1 \times (s / h)^{-0.33} \times F_s^{\alpha_3} \quad (2)$$

O expoente -0.33 corresponde ao ângulo de  $19^{\circ} 28'$  entre a trajetória do navio e o lugar geométrico das amplitudes máximas da elevação da superfície livre, enquanto o coeficiente  $\alpha_1$  e o expoente  $\alpha_3$  têm que ser determinados a partir de valores medidos em modelo ou em protótipo.

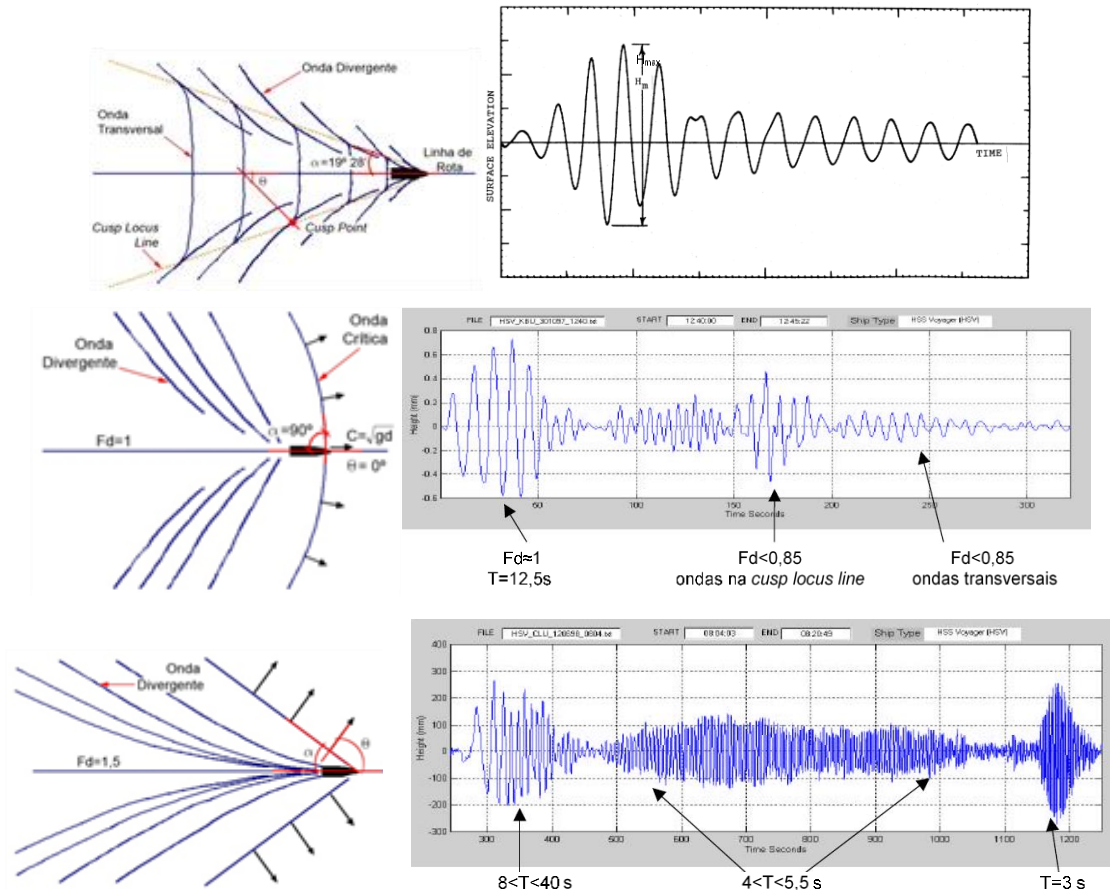


Figura 2. Padrão de ondas geradas por um navio com  $F_s < 0.7$  (cima),  $F_s = 1$  (meio) e  $F_s > 1.2$  (baixo) e correspondente série temporal da elevação da superfície livre medida num ponto fixo. (Adaptado de MCA 2001)

Da mesma teoria e da teoria de ondas em águas profundas resulta para o comprimento da onda

$$L_{wi} = 2 \times \pi \times \cos^2(35^\circ 22') \times V_s^2 / g \quad (3)$$

Obtendo-se o período da mesma onda partir da relação de dispersão para grandes profundidades

$$T_i = (2 \times \pi \times L_{wi} / g)^{1/2} \quad (4)$$

O critério de grandes profundidades ( $L_{wi} < 2h$ ) implica que  $F_s < 0.7$

Verhey e Bogaerts (1989) indicam que os resultados de medições em protótipo e em modelo confirmam  $\alpha_3 = 4$ . Os mesmos autores sugerem:

- $\alpha_1 = 1.0$  para rebocadores, navios patrulha e navios convencionais para navegação em águas interiores;
- $\alpha_1 = 0.5$  para barcas em lastro;
- $\alpha_1 = 0.35$  para navios convencionais em lastro.

Estas expressões, juntamente com as características geométricas do padrão de ondas gerado pelo navio, foram utilizadas para estabelecer a gama de velocidades e distâncias a testar em modelo físico, como se verá nos pontos seguintes.

### 3 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

#### 3.1 Equipamento e técnicas de medição

O objetivo principal dos ensaios foi caracterizar as ondas de esteira produzidas por um navio em movimento, o “Aurora”, e os consequentes movimentos induzidos num navio, o “Esso Osaka”, que de outra forma estaria parado nas imediações da trajetória seguida pelo “Aurora” e considerando diferentes velocidades de avanço deste navio.

Os ensaios foram realizados no tanque 6 do Pavilhão de Hidráulica Marítima do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Figura 3, com dimensões aproximadas de 23 m × 22 m (comprimento × largura).

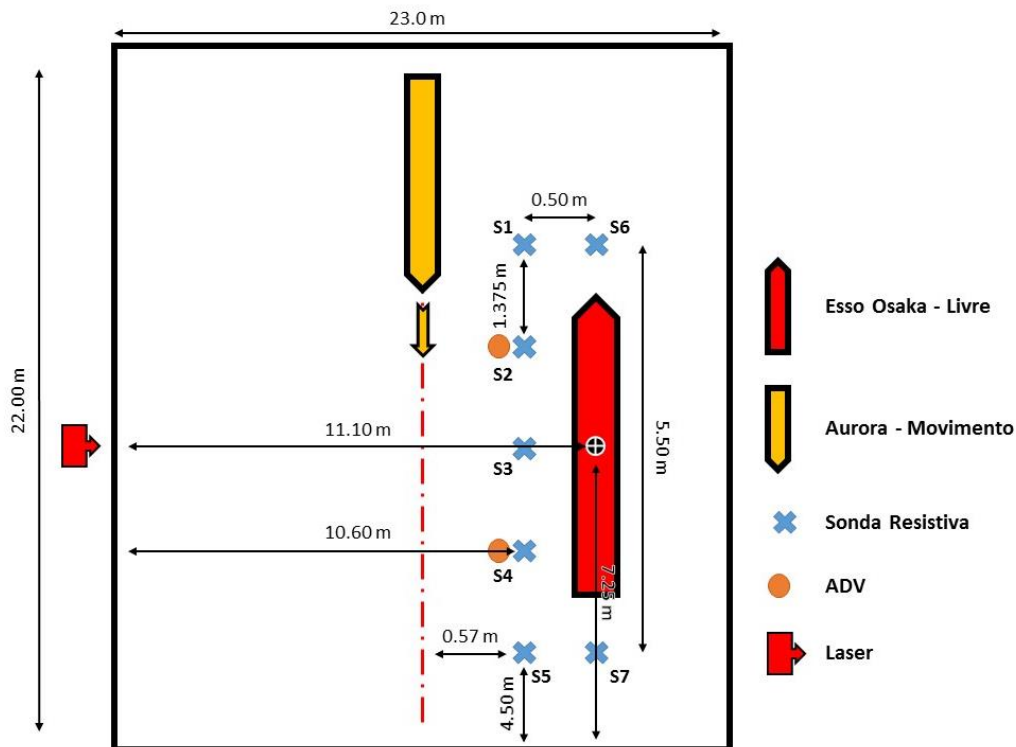


Figura 3. Instalação experimental: Esquema do posicionamento dos navios e do equipamento

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

O navio “Esso Osaka” foi colocado na posição  $x = 11.10$  m com a proa perpendicular ao comprimento do tanque e as 8 sondas resistivas e os 2 velocímetros acústicos foram dispostos de acordo com a Figura 3. O navio “Aurora” efetuou viagens na direção Este-Oeste (ao longo da largura do tanque) com diferentes velocidades a uma distância pretendida das sondas de 0.57 m.

As 7 sondas resistivas foram utilizadas para medição da elevação da superfície livre, com uma frequência de aquisição de 25 Hz. As sondas estão dispostas conforme indicado na Figura 3 e servem para caracterizar o campo de ondas de esteira que chega ao “Esso Osaka” devido ao movimento do navio “Aurora”.

Para medir as velocidades do escoamento associado às ondas geradas pelo “Aurora”



foram utilizados dois velocímetros acústicos – *Acoustic Doppler Velocimeter* –, com os quais é possível medir as componentes da velocidade nos 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 3, colocados junto às sondas, como mostrado na Figura 4.



Figura 4. Navio “Esso Osaka”, b) Navio “Aurora”; c) Sondas resistivas e velocímetros

O giroscópio de fibra ótica OCTANS instalado no “Esso Osaka” é capaz de medir 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 das quais se pode estimar 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). A frequência de aquisição de dados do giroscópio foi 20 Hz.

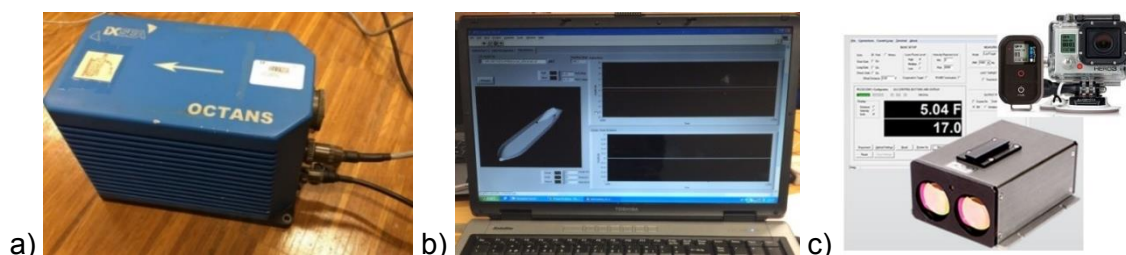


Figura 5. a) Giroscópio de fibra ótica; b) Interface do sistema de aquisição de dados; c) Laser scan e câmara GoPro

O laser scan foi colocado perpendicularmente ao navio “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”, Figura 5 c).

A camara GoPro foi colocada também do lado de fora para filmar todas as experiências realizadas.

### 3.2 Condições Experimentais

O navio “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 navio “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 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, sendo o peso total do modelo (navio + blocos + equipamento) de 214.15 kgf.

O “Aurora” dispõe um 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  $2.0 \text{ ms}^{-1}$ . Navegando em grandes profundidades com um calado de 0.11 m. Para a condição de carga testada tinha-se uma massa do navio + equipamento + carga de 83.78 kgf, que corresponde um calado de 0.105 m e um deslocamento de  $83.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ .

Todos os testes foram realizados para uma potência do motor igual a 90% da potência máxima. Para as duas profundidades testadas, com esta potência obtiveram-se velocidades de avanço do “Aurora” próximas de  $0.80 \text{ ms}^{-1}$ .

As viagens do “Aurora” iniciavam-se com o navio parado orientado segundo uma direção paralela ao lado menor do tanque (e paralela ao alinhamento das sondas de medição da elevação da superfície livre) e terminavam a cerca de 4 m da sonda 5. Atendendo ao ângulo entre a trajetória do navio e a linha de máximo da altura das ondas geradas pelo movimento do “Aurora” 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. O ângulo acima implica que o valor de  $F_s$  seja sempre inferior a 0.7.

Todas aquelas viagens começavam com o navio a 0.57 m do alinhamento das sondas

S1 a S5. Foram consideradas duas profundidades nestes ensaios: 0.82 m e 0.34 m. A primeira corresponde a uma situação de grande profundidade para os dois navios pois é maior que 4,2 vezes o calado de qualquer dos navios, isto é, o escoamento em torno do casco do navio não é influenciado pela proximidade do fundo. Já para a segunda profundidade isso não é válido.

- O modo de procedimento em cada ensaio foi:
- Ajuste do nível de água no tanque;
- Colocação de blocos, pesos e equipamento em cada um dos navios;
- Ligação e/ou colocação dos equipamentos para medição da elevação da superfície livre e velocidades;
- Calibração das sondas resistivas;
- Realização da viagem do navio “Aurora” correspondente a uma velocidade de movimento.

#### 4 O PACOTE NUMÉRICO SWAMS

Este pacote resulta da acoplagem de modelos numéricos para a propagação de ondas com um modelo para o comportamento de navios amarrados, permitindo assim a identificação de estados de mar adversos e o melhor planeamento das atividades portuárias.

O SWAMS fornece as séries temporais dos movimentos de navios amarrados, bem como das forças nos elementos do sistema de amarração (amarra e defensas), partindo do conhecimento das condições de agitação marítima ao largo. Uma vez que esta informação pode ser obtida a partir de medições realizadas por boias ondógrafo ou dos resultados de modelos de previsão da agitação marítima à escala oceânica, isso torna o pacote SWAMS uma ferramenta muito útil, quer para o projeto de infraestruturas portuárias, quer para o planeamento de atividades portuárias.

Para a propagação da agitação marítima, o pacote SWAMS, Pinheiro et al. (2013), utiliza o modelo BOUSS-WMH - *Boussinesq Wave Model for Harbours*, Pinheiro (2007) – que é capaz de simular com exatidão a propagação de estados de agitação em regiões marítimas de profundidade não uniforme, levando em conta a refração, a difração e a reflexão parcial da agitação marítima, bem como as interações não-lineares entre ondas e a dissipação de energia devida ao atrito de fundo ou à rebentação das ondas.

Para a simulação do comportamento de navios amarrados, o pacote SWAMS utiliza o pacote numérico MOORNAV (Santos, 1994), que recorre aos resultados obtidos no domínio da frequência com o modelo numérico WAMIT (Korsemeyer et al. 1988) para os problemas de radiação e de difração de um navio livre. Esses resultados são passados para o domínio do tempo e utilizados pelo modelo BAS (Mynett et al. 1985) na montagem e resolução, no domínio do tempo, das equações de movimento do navio amarrado, levando em conta a agitação incidente, bem como a geometria e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração.

Uma vez que o modelo WAMIT foi desenvolvido para avaliar os esforços em estruturas flutuantes colocadas ao largo, é necessário proceder a ajustes no mesmo para lidar com o problema de difração de um navio livre no interior de uma bacia abrigada. A alternativa considerada no pacote SWAMS é a utilização das relações estabelecidas em Haskind (1957) envolvendo o potencial do escoamento associado às ondas radiadas pelo navio e o potencial das ondas incidentes na posição que o navio



ocuparia.

O SWAMS foi desenvolvido em Microsoft Access™, que tem a vantagem de incluir a linguagem de programação orientada a objetos e com gestão de eventos *Visual Basic for Applications* (VBA). Uma vantagem desta linguagem é a possibilidade de interação com várias aplicações Microsoft Windows.

Para a representação de dados e resultados do SWAMS utilizam-se vários programas disponíveis comercialmente: Autocad™, *Golden Software Surfer*™, Tecplot™ e MS Excel™. Todos estes programas de visualização são invocados por macros ativadas por eventos que automatizam todo o processo de criação de gráficos e mapas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ondas geradas pelo “Aurora”

Embora todas as viagens começassem com o “Aurora” a uma distância de 0.57 m do alinhamento definido pelas sondas 1 a 5, o funcionamento do sistema de controlo ainda não permite que nessas viagens o “Aurora” passe à mesma distância do “Esso Osaka”. Assim, os ensaios realizados para uma dada profundidade da água no tanque distinguem-se entre si pela distância entre o “Aurora” e o “Esso Osaka”, como pode ver-se na Tabela 1, para os ensaios na profundidade de 0.82 m e na Tabela 2, para os ensaios na profundidade 0.34 m.

As mesmas tabelas apresentam também a velocidade de avanço do “Aurora”. Esta foi estimada com base em dois procedimentos distintos. O primeiro utiliza o tempo que o “Aurora” demora a passar em frente do laser, Figura 6, e a hipótese do comprimento do “Aurora” obstruindo o laser igualar o comprimento fora a fora do “Aurora” (2,587 m). O segundo, parte do caráter estacionário, em relação ao navio, do sistema de ondas gerado pelo seu avanço com velocidade constante. Assim estimou-se a velocidade a partir do tempo que o padrão de ondas demora a passar de uma sonda de elevação da superfície livre para a seguinte. Utilizaram-se as sondas 2, 3, e 4.

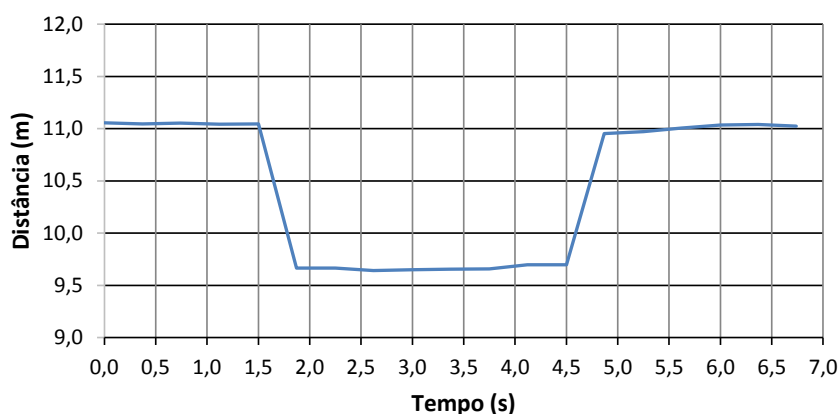


Figura 6. Série temporal das distâncias medidas pelo laser scan ao longo de um ensaio

Tabela 1. Testes realizados com a profundidade de 0.82 m

Teste	Distância Aurora – Sondas (m)	Velocidade Laser (ms <sup>-1</sup> )	Velocidade Sondas (ms <sup>-1</sup> )		
			S2 -S3	S3 - S4	Média
01	0.81	0.862	0.64	0.73	0.68
02	0.85	0.984	0.65	0.67	0.66
03	0.81	0.862	0.82	0.84	0.83
04	0.91	0.987	0.66	0.84	0.75
05	1.56	0.984	0.82	0.82	0.82
06	0.79	0.862	0.82	0.67	0.75
07	0.61	0.862	0.82	0.69	0.75
08	0.71	0.984	0.86	0.86	0.86
09	0.93	0.987	0.82	0.84	0.83
10	0.76	0.987	0.66	0.84	0.75

Tabela 2. Testes realizados com a profundidade de 0.34 m

Teste	Distância Aurora – Sondas (m)	Velocidade Laser (ms <sup>-1</sup> )	Velocidade Sondas (ms <sup>-1</sup> )		
			S2 -S3	S3 - S4	Média
19	1.89	0.98	-	-	-
24	0.44	0.86	0.88	0.86	0.87
25	0.32	0.86	0.88	0.90	0.89
26	0.45	0.86	0.95	0.88	0.92
27	0.53	0.86	0.90	0.84	0.87
28	0.25	0.86	0.78	0.82	0.80
29	0.04	0.86	1.07	0.88	0.98
30	0.05	0.77	0.98	0.80	0.89
31	0.15	0.86	0.88	0.88	0.88
32	0.09	0.78	0.90	0.82	0.86

Embora em conceito esta seja uma abordagem exequível, os problemas começam com a identificação do padrão associado às ondas geradas pelo navio. Como pode ver-se na Figura 7, com a elevação da superfície livre medida na sonda 2 (a) e na sonda 3 (b) na condição de teste correspondente a uma profundidade de 0.82 m, uma

velocidade de avanço de  $0.86 \text{ ms}^{-1}$  e uma distância às sondas de  $0.61 \text{ m}$ , não é claro que o padrão da sonda 2 tenha passado para a sonda 3.

Ponto interessante na Tabela 1, bem como na Tabela 2, é a evidência da velocidade do “Aurora” ainda não ter estabilizado. Com efeito, apenas no Teste 5, no Teste 8 e no Teste 31 as velocidades obtidas a partir da passagem do padrão de ondas da sonda 2 para a sonda 3 igualam a velocidade a partir da passagem da sonda 3 para a sonda 4. Em quase todos os testes realizados com a profundidade de  $0.82 \text{ m}$  a velocidade parece ainda estar a crescer (as exceções são o Teste 6 e o Teste 7). Nos testes realizados com a profundidade de  $0.34 \text{ m}$  apenas o Teste 25 e o Teste 28 apresentam um crescimento da velocidade no sentido do avanço do navio. Em todos os outros a velocidade diminui.

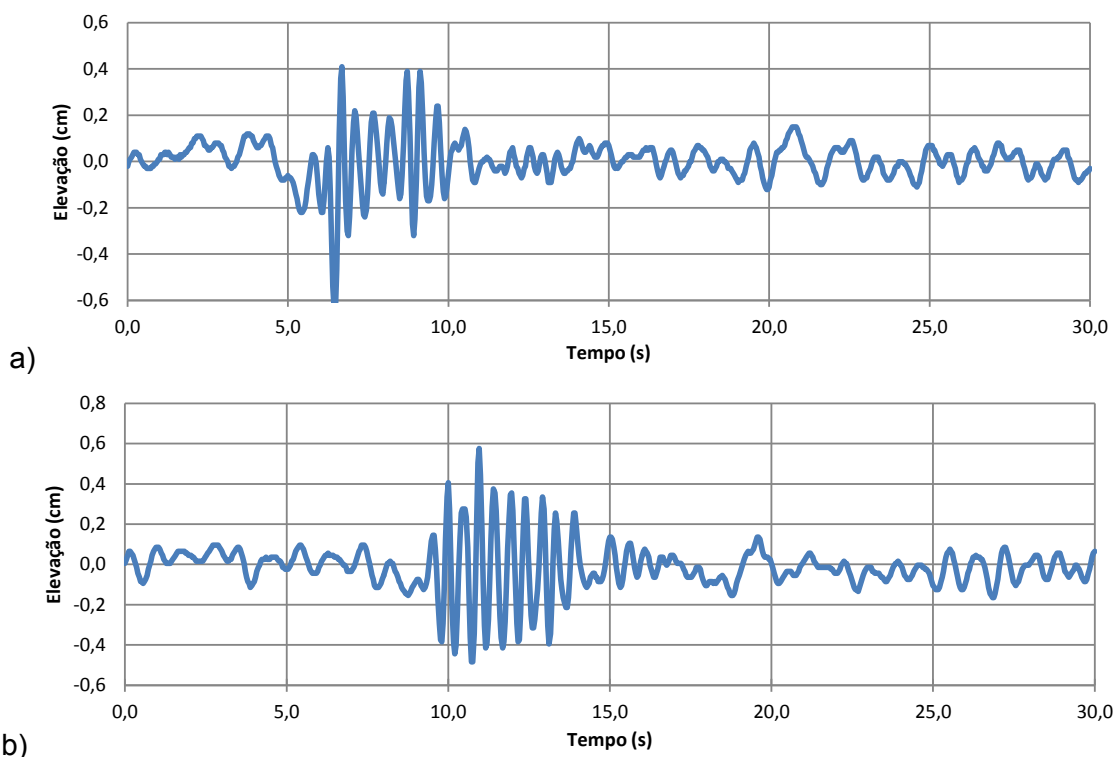


Figura 7. Séries temporais da elevação da superfície livre medida a) na sonda 2 e b) na sonda 3 ao longo do Teste 7 (profundidade da água no tanque  $0.82 \text{ m}$  e distância do “Aurora” às sondas  $0.61 \text{ m}$ )

Comparando a velocidade obtida com o laser scan com a velocidade média a partir das sondas, verifica-se que, para os testes realizados com a profundidade de  $0.82 \text{ m}$ , a primeira é sempre maior que a segunda. Para os testes realizados com a profundidade de  $0.34 \text{ m}$  passa-se o oposto: a velocidade obtida com o laser scan é inferior à velocidade obtida a partir das sondas.

Considerando o valor médio da velocidade do navio fornecido pelas medições com o laser, pode afirmar-se que para a profundidade de  $0.82 \text{ m}$  a velocidade média é  $0.94 \text{ ms}^{-1}$  e para a profundidade de  $0.34 \text{ m}$  a velocidade média é  $0.86 \text{ ms}^{-1}$ . Resulta então, utilizando as equações (3) e (4), para o comprimento da onda e para o período os valores de  $0.38 \text{ m}$  e  $0.49 \text{ s}$ , para a profundidade de  $0.82 \text{ m}$  e de  $0.32 \text{ m}$  e  $0.45 \text{ s}$ , para a profundidade de  $0.34 \text{ m}$ .

Os períodos obtidos para as duas profundidades são muito semelhantes entre si e

comparáveis aos estimados a partir da contagem de ondas nas séries temporais da elevação da superfície livre apresentadas na Figura 7.

Quando se observam as séries temporais da elevação da superfície livre medidas na situação com a profundidade de 0.34 m verifica-se que a chegada das ondas geradas pelo “Aurora” é acompanhada de uma depressão do nível médio que corresponderá à passagem do “Aurora” frente à sonda. Nos ensaios em que a distância do “Aurora” às sondas é maior, essa depressão deixa de ser notada. Tal pode confirmar-se na Figura 8, com a elevação a superfície livre na sonda 3 no Teste 29 (a) e no Teste 19 (b).

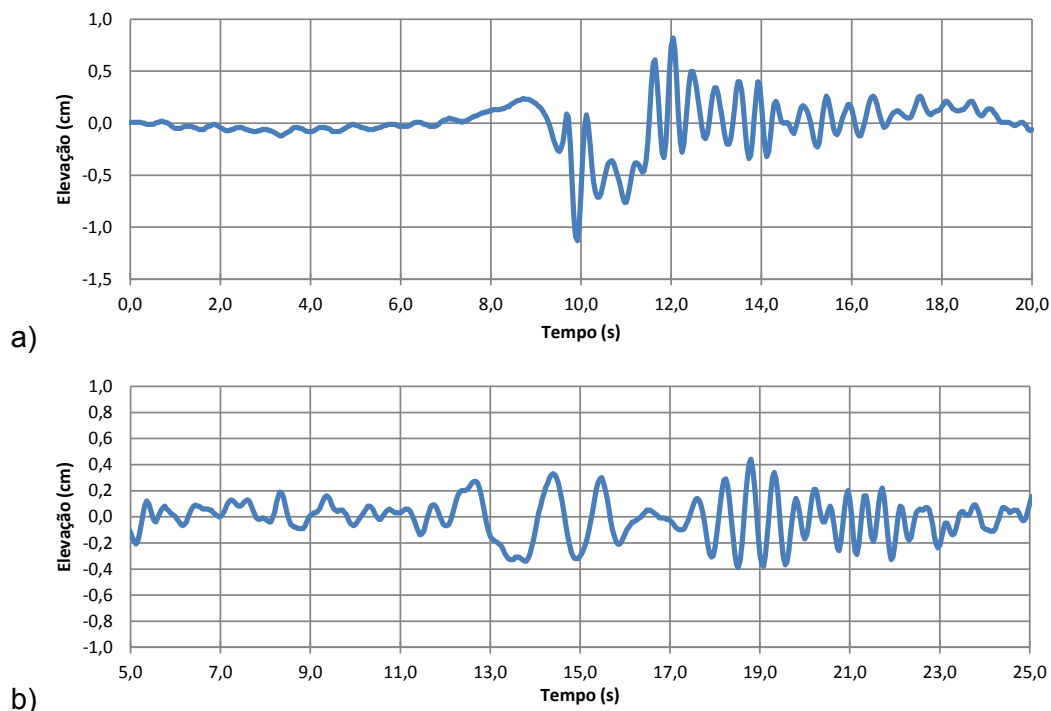


Figura 8. Séries temporais da elevação da superfície livre medidas na sonda 3 em testes realizados com a profundidade de água no tanque igual a 0.34 m. Navio “Aurora” afastado das sondas a) 0.04 m das sondas; b) 1.89 m

No primeiro caso a distância do “Aurora” às sondas é 0.04 m e é nítida a existência da depressão no nível médio enquanto no segundo caso, em que a distância é 1.89 m, não se observa qualquer depressão.

Na Tabela 3 e na Tabela 4 apresentam-se os valores máximos da altura das ondas observados em cada sonda quando passava o sistema de ondas gerado pelo “Aurora”, respetivamente para os testes realizados com uma profundidade de água no tanque de 0.82 m e de 0.34 m. Apenas para o teste 19, não foi possível identificar em todas as sondas a passagem daquele sistema de ondas.

Em alguns testes, observa-se o crescimento da altura máxima da onda com o percurso do “Aurora”, sendo claro em todos os testes (a única exceção é o Teste 19) que a altura máxima é maior na sonda 5 que na sonda 1.

Utilizando os valores da altura máxima observada na sonda 3, a velocidade média de cada teste e a distância correspondente, com a equação (2) obteve-se os valores teóricos da altura máxima das ondas no sistema gerado pelo movimento do “Aurora”. Na Figura 9, apresenta-se as curvas para os valores de  $\alpha_1 = 1.0$  e  $\alpha_1 = 0.35$ , bem como

os valores medidos na sonda 3 para as duas profundidades consideradas no tanque. Em ambos os casos verifica-se que os pontos experimentais se aproximam das curvas para  $\alpha_1 = 1.00$ .

Tabela 3. Altura máxima das ondas associadas ao movimento do “Aurora” nos testes realizados com a profundidade de 0.82 m

TESTE	Altura Máxima (cm)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1	0.89	0.97	0.86	0.96	0.99
2	0.88	0.91	1.13	0.99	0.95
3	0.77	0.98	0.94	0.91	0.98
4	0.79	1.02	1.06	0.90	0.98
5	0.62	0.88	0.94	0.96	1.00
6	0.86	1.11	1.13	1.02	1.27
7	1.06	1.00	1.06	0.99	1.12
8	0.84	1.08	1.12	1.08	1.14
9	0.72	0.90	1.04	0.94	1.12
10	0.82	1.03	1.02	0.96	1.08

Tabela 4. Altura máxima das ondas associadas ao movimento do “Aurora” nos testes realizados com a profundidade de 0.34 m

TESTE	Altura Máxima (cm)				
	S1	S2	S3	S4	S5
19	1.49	1.19	0.82	-	-
24	0.88	1.29	1.11	1.22	1.19
25	0.84	1.01	1.00	1.07	1.22
26	0.91	1.23	1.22	1.22	1.21
27	0.90	1.42	1.19	1.03	1.17
28	0.94	1.37	1.07	1.10	1.34
29	0.90	1.23	1.22	1.57	1.41
30	1.00	1.35	1.11	1.34	1.56
31	0.86	1.06	1.14	1.20	1.34
32	0.86	1.13	1.26	1.17	1.30

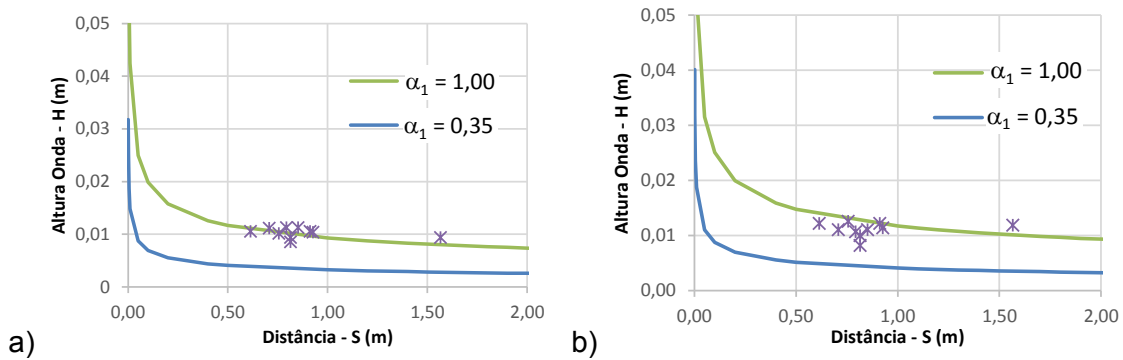


Figura 9. Altura máxima das ondas associadas ao movimento do “Aurora” medidas na sonda 3 e estimadas com a equação (2). Profundidade no tanque de a) 0.82 m ( $V_s = 0.94 \text{ ms}^{-1}$ ); b) 0.34 m ( $V_s = 0.86 \text{ ms}^{-1}$ )

## 5.2 Movimentos do “Esso Osaka”

A Figura 10 apresenta as séries temporais dos movimentos do “Esso Osaka” segundo cada um dos seus seis graus de liberdade no Teste 7, isto é, profundidade no tanque de 0.82 m (velocidade de avanço do “Aurora” de  $0.86 \text{ ms}^{-1}$ ). Na figura é possível verificar qualitativamente as diferenças nos períodos das oscilações segundo os graus de liberdade no plano horizontal (*surge*, *sway* e *yaw*) e os graus de liberdade no plano vertical (*heave*, *roll* e *pitch*). De referir que ondas com uma altura de 1.06 cm e um período de 0.49 s dão origem a oscilações de balanço (“*roll*”) - movimentos no plano vertical - com uma “altura” de 0.22 graus e períodos de 1.2 s e a oscilações de avanço (“*surge*”) e deriva (“*sway*”) - movimentos no plano horizontal - com uma altura de 1 cm e períodos de 15 s.

A maior dificuldade na análise destes valores é garantir a sincronização entre as medições da elevação da superfície livre e as medições dos movimentos segundo cada um dos graus de liberdade. Com efeito, enquanto cada viagem do “Aurora” deu origem a um ficheiro com o registo da elevação da superfície livre, os movimentos do “Esso Osaka” na sequência de ensaios realizada num dado dia foram todos registados no mesmo ficheiro. Isso dificulta o estabelecimento de relações de causalidade entre as ondas que chegam ao “Esso Osaka” e os movimentos do mesmo.



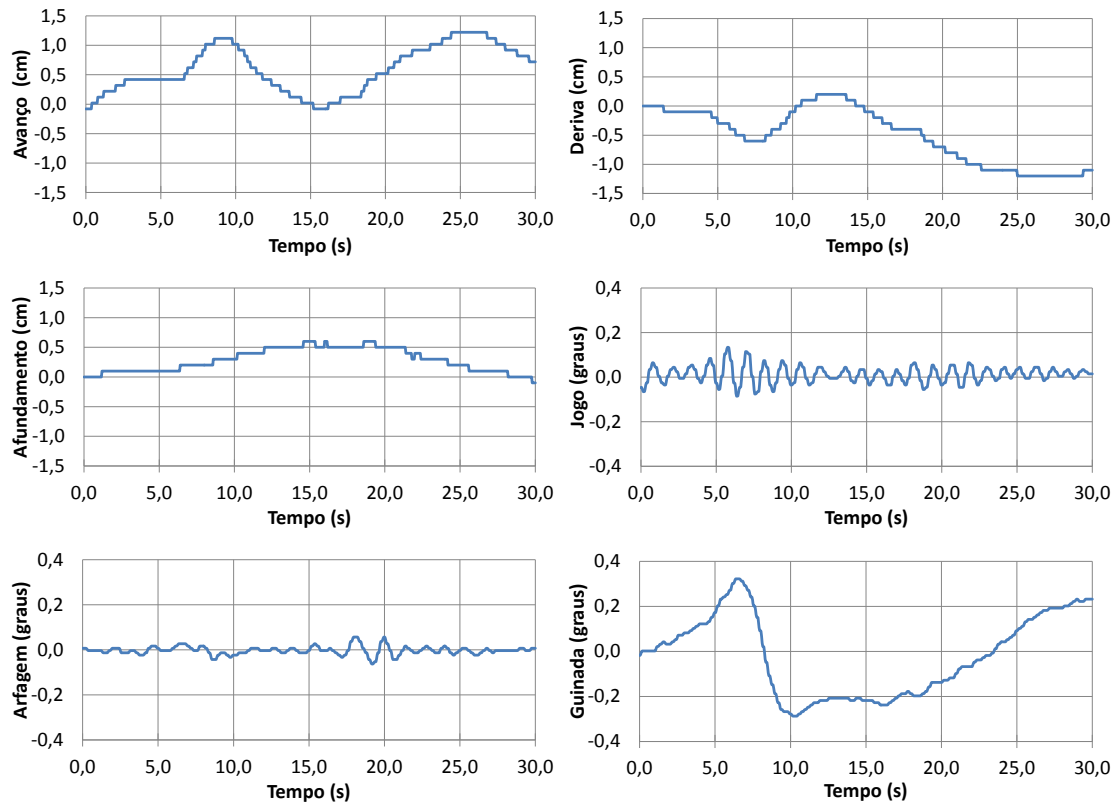


Figura 10. Séries temporais dos movimentos do “Esso Osaka”. Profundidade da água no tanque: 0.82 m; “Aurora” deslocando-se a uma distância de 0.61 m do alinhamento das sondas (0.84 m do “Esso Osaka”) com uma velocidade de  $0.86 \text{ ms}^{-1}$

### 5.3 Resultados da Modelação Numérica WAMIT/SWAMS

A abordagem utilizada para este problema consistiu em começar por resolver no domínio da frequência a interação do navio livre com as ondas incidentes. Para tal determinaram-se as forças exercidas por ondas regulares incidentes no navio imobilizado segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio (o chamado problema de difração) bem como as forças em fase com a aceleração e com a velocidade segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio - respetivamente, os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento - exercidas no navio quando este oscila com movimentos sinusoidais segundo um daqueles graus de liberdade em águas de outro modo paradas (o chamado problema de radiação).

Na resolução dos problemas de difração e de radiação utilizou-se o modelo numérico WAMIT que se baseia num método de elementos de fronteira para modelar a interação com ondas regulares de um corpo flutuante livre. O modelo determina a intensidade de uma distribuição uniforme de fontes em cada um dos painéis com que se discretiza a fronteira molhada dos corpos, flutuantes ou não, envolvidos no problema. Com aquela distribuição de fontes obtém-se em qualquer ponto do fluido, incluindo a sua fronteira, o potencial do escoamento associado ao problema de difração ou a cada um dos problemas de radiação.

A forma do casco foi obtida a partir de uma painelização com 644 painéis. O volume de água deslocado pelo casco painelizado é de  $0.220 \text{ m}^3$ .

Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 0.82m.

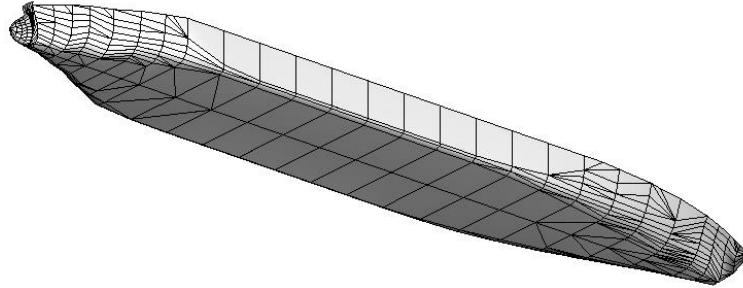


Figura 11. Painelização do casco do navio Esso Osaka

Com base nos resultados do problema de radiação determinaram-se as forças exercidas no navio ao longo do tempo depois de uma variação impulsiva segundo uma componente da sua velocidade - as funções resposta a impulso ou funções de atraso, Cummins (1962) - e as forças associadas à aceleração do escoamento na vizinhança do casco do navio - as massas adicionadas para frequência infinita.

Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difração do navio livre para 89 frequências entre 0.02 rad/s e 2.72 rad/s.

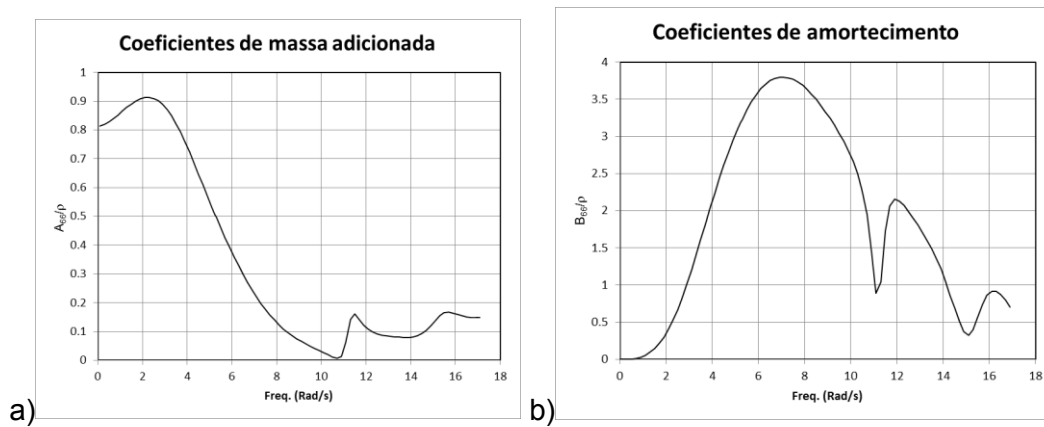


Figura 12. Coeficientes de massa adicionada (A66) (a) e de amortecimento (B66) (b) para o momento de guinada devido ao movimento de guinada

A partir das medidas de todos os testes foi determinada a função de transferência associada a cada teste. Uma função de transferência, também conhecida como operador de amplitude de resposta (RAOs), é uma medida do efeito que um estado do mar terá sobre os movimentos de um navio. A função de transferência depende da frequência. Os movimentos do navio são assumidos como lineares, e a função de transferência (ou *Response Amplitude Operator*, RAO) é dada por:

$$RAO(\omega) = \frac{x(\omega)}{H_{s1}(\omega)} \quad (1)$$

onde  $x$  é um grau de liberdade (por exemplo, um vetor de movimentos rígidos do corpo) e  $H_{s1}$  é a altura da onda medida na sonda  $s1$ . A mudança de fase entre a excitação e os movimentos do navio não é considerada neste trabalho, portanto, apenas o valor absoluto das funções de transferência é considerado:

$$x = [H_{Tx}, H_{Ty}, H_{Tz}, R_x, R_y, R_z] \quad (2)$$

Os componentes  $H_{Tx}, H_{Ty}, H_{Tz}, R_x, R_y, R_z$  são resultado da análise das séries temporais de movimentos do navio.

Os resultados do modelo numérico WAMIT também são apresentados e comparados aos resultados experimentais.

A Figura 13 apresenta as funções de transferência (experimental e numéricas) para os seis movimentos do navio. Nessas figuras, existe uma linha contínua preta correspondente à função de transferência calculada para o ângulo assumido entre o eixo longitudinal do navio e a direção de propagação da onda, enquanto as linhas tracejadas representam as funções de transferência calculadas para variações de alguns graus nesse ângulo. Esta análise permite inferir sobre a incerteza do ângulo de ataque de onda real nos testes experimentais.

Dos resultados obtidos verifica-se que a resposta do navio Esso Osaka (movimento do seu centro de gravidade) é máxima quando a frequência da onda incidente é cerca de 0.90 Hz (ou  $T=1.1$  s) nos movimentos de abatimento e cabeceio. Por outro lado, nos movimentos de guinada, deriva e balanço, a resposta é máxima quando a frequência da onda incidente é cerca de 0.62 Hz (ou  $T=1.6$  s). Para as frequências das ondas de esteira reproduzidas nos ensaios aqui apresentados (2.041Hz e 2.22Hz), a resposta do navio é muito reduzida, e aproxima-se de zero, em qualquer dos seis movimentos, quando a frequência aumenta. Os dados do ensaio analisado (Teste 7), com exceção do movimento de guinada, mostram uma resposta também ela de reduzida amplitude. No entanto, os valores constantes nos gráficos são sempre superiores aos esperados numericamente. É de salientar que estes ensaios resultam de testes ainda preliminares onde foram identificados uma série de aspetos a melhorar de forma a obter dados mais rigorosos. As amplitudes medidas são tão pequenas que os efeitos laboratório sobrepujam-se às quantidades medidas.

Devido a estas incertezas não é possível elaborar sobre o ângulo de ataque das ondas nos testes experimentais.

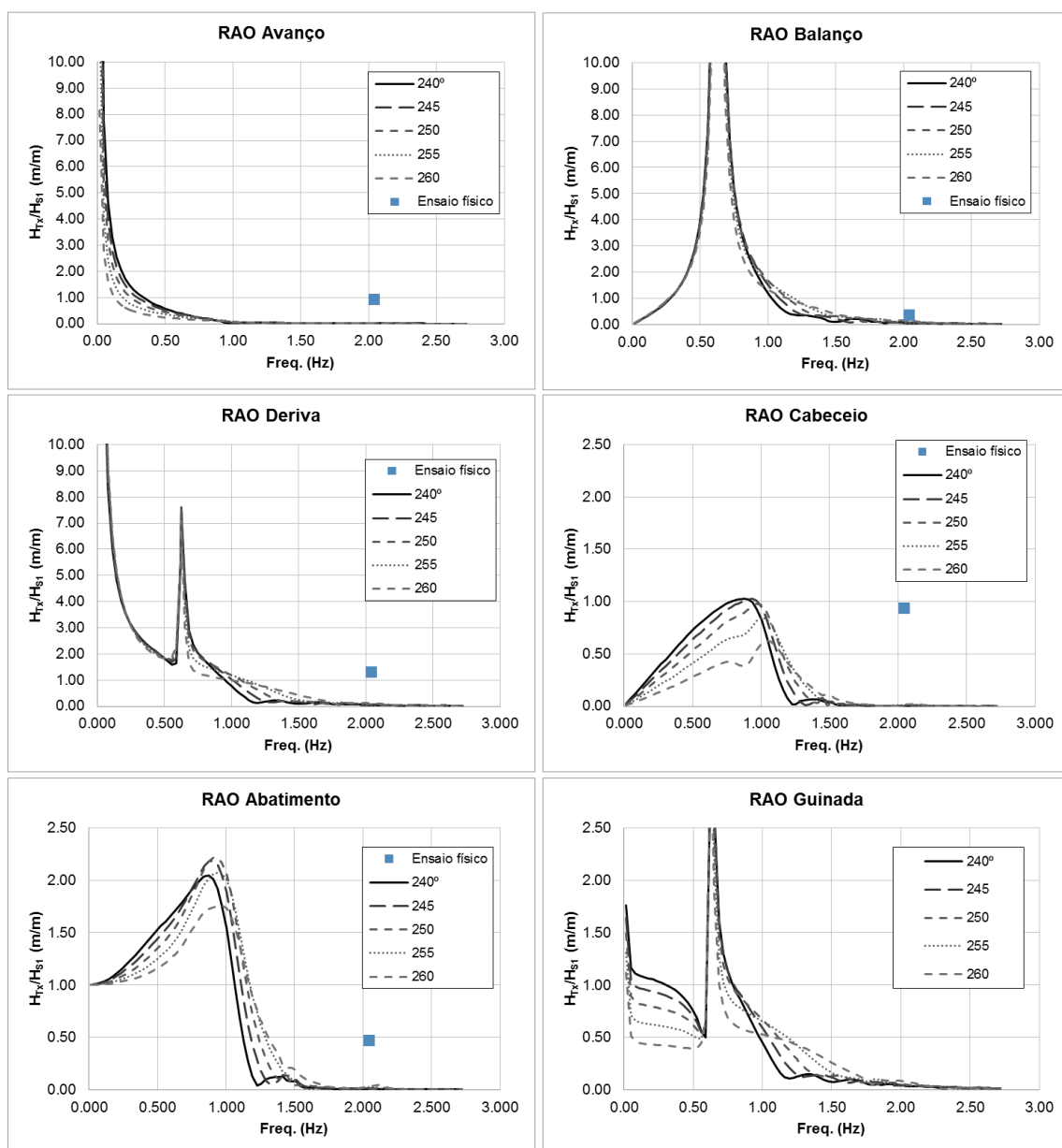


Figura 13. Funções de transferência do navio (RAO), obtidos numericamente (linhas cinzentas) e do Teste 7 (ponto azul)

## 6 CONCLUSÕES

Nesta comunicação analisaram-se as ondas geradas pelo movimento de um navio autopropulsionado que deveria deslocar-se em linha reta. Os testes tiveram um carácter exploratório, tendo-se avaliado a capacidade do sistema de controlo do navio garantir uma trajetória retilínea, bem como o alcançar uma velocidade de avanço estável na proximidade de um navio de outra forma parado.

As medições efetuadas mostraram que o sistema de controlo do navio ainda necessita de alguma afinação para garantir a trajetória retilínea. A aceleração do navio não é nula na zona de interesse o que torna premente a implementação de um procedimento

alternativo para impor a velocidade de avanço desejada para o navio.

Para que as medições dos movimentos induzidos no navio de outra forma parado pelo sistema de ondas gerado pelo navio em movimento possam ter relevância para o estudo desta interação, é necessário garantir o sincronismo de todas as medições efetuadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradem 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.

## 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.

Cummins, W.E., 1962. Impulse response function and ship motions. *Schiffstechnik*, 9, 101-109.

Haskind, M.D., 1957. *The Exciting Forces and Wetting of Ships in Waves*, Izvestia Akademii Nauk S.S.S.R, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk, 7, 65-79. (David Taylor Model Basin Translation N<sup>o</sup>.307, March 1962).

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 of London, Series A, pp. 398-430.

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

Hinostroza M.A., Xu Haitong, Guedes Soares C. 2017. Experimental and numerical simulations of zig-zag manoeuvres of a self-running ship model, Submitted for publication.

Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Sclavounos P.D., 1988. The analysis of waveeffects on tensionleg 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. of Mechanical Engineers, pp. 409-433 Maritime and Coastguard Agency

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

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.

PIANC, 1995. Feasibility of waterborne public transport in the Netherlands. Bulletin N<sup>o</sup> 88.

PIANC, 2003. Guidelines for managing wake wash from high-speed vessels. MarCom

Report of WG 41.

Pinheiro, L. V., 2007. *A Finite Element Method for the Discretization of the Extended Boussinesq Equations*. Master's degree dissertation in Mechanical Engineering, IST.

Pinheiro, L. V.; Santos, J.A.; Fortes, C.J.E.M., 2013. Simulação numérica do comportamento de navios amarrados em bacias abrigadas. *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*. Rio Grande, v.23, n.1. pp. 85-103, ISSN IMPRESSO: 0102-7352.

Santos, J.A., 1994. *MOORNAV – Numerical Model for the Behaviour of Moored Ships*. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves.

MCA, 2001. Research project 457 - A physical study of fast ferry wash characteristics in shallow waters. Final report.

Verhey, H.J., Bogaerts, M.P., 1989. Ship waves and the stability of armour layers protecting slopes. Report 428 Delft Hydraulics.