

# ENSAIOS EM MODELO FÍSICO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA EM REDOR DE UM NAVIO LIVRE

## PHYSICAL MODELING OF SEA WAVES PROPAGATION AROUND A FLOATING SHIP

A. Ramos<sup>1</sup>, C. J. Fortes<sup>2</sup>, L. V. Pinheiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bolseiro de Experimentação, NPE/DHA-LNEC, Lisboa - Portugal.

<sup>2</sup>Investigadora Principal, NPE/DHA-LNEC, Lisboa - Portugal.

<sup>3</sup>Bolseira de Pós-Doutoramento, NPE/DHA-LNEC, Lisboa - Portugal.



### RESUMO

*Nesta comunicação, descrevem-se os ensaios em modelo físico realizados com o objetivo de caracterizar o campo de ondas em torno de um navio livre, quando sujeito a condições de agitação incidente regular e irregular. Estes dados são especialmente importantes para a validação de modelos numéricos de caracterização da resposta de navios à ação da agitação incidente. Assim, para cada condição de agitação incidente, efetuaram-se medições da elevação da superfície livre e das componentes da velocidade em diversos pontos em redor do navio. Apresentam-se as seguintes análises dos dados experimentais: análise temporal e espectral (espectro de energia e wavelets) dos valores de elevação da superfície livre e análise temporal da velocidade das partículas, a meio da coluna de água. A análise temporal e espectral de cada série de medições obtida permitem a caracterização da agitação nos pontos em redor do navio, em termos de alturas, períodos e velocidade. Avalia-se também a influência do navio nas características da agitação.*

### ABSTRACT

*In this paper, are described the physical model tests conducted in order to characterize the sea wave propagation around a floating ship, when subjected to regular and irregular waves conditions. These data are particularly important for the validation of numerical models to characterize the ships response, when subjected to the action of different wave conditions. So, for each different wave condition, the elevation of the free surface was measured, along with the velocity components at various points around the ship. Are presented the following analysis of the experimental data: wave-by-wave and spectral (energy spectrum and wavelets) analysis of the elevation of the free surface and wave-by-wave analysis of the velocity components. The wave-by-wave and spectral analysis of each series of measurements allows the characterization of the sea wave propagation in several points around the ship (heights, periods and velocities). The influence of the presence of the ship in the sea waves propagation is also evaluated.*

### 1. INTRODUÇÃO

A caracterização do campo de ondas ao longo das trajetórias dos navios e nos postos de acostagem permite caracterizar a resposta

dos navios aos estados de mar neles incidentes, quer estejam amarrados, parados ou em manobra. Essa caracterização do campo de ondas pode ser efetuada por diferentes ferramentas, tais como empíricas, numéricas,

neuronais ou ensaios em modelo físico. Cada tipo de ferramenta tem vantagens e desvantagens inerentes, sendo a sua escolha dependente dos objetivos pretendidos. A modelação física é especialmente indicada quando se pretende estudar fenómenos complexos de interação fluido-estrutura (em condições controladas), como é o caso da propagação de ondas em torno de um navio.

Nesse sentido, foram efetuados ensaios em modelo físico para a simulação da propagação de ondas regulares e irregulares de encontro a um navio livre com vista à caracterização do campo de ondas em seu redor (alturas, período, direções e velocidades). Efetuaram-se medições da elevação da superfície livre e das componentes da velocidade em diversos pontos localizados junto ao navio. Os mesmos ensaios foram repetidos sem navio de modo a avaliar as diferenças entre as duas situações (sem e com navio).

Com os dados obtidos, efetuou-se primeiramente uma análise temporal aos dados de elevação da superfície livre obtidos nas sondas, de modo a caracterizar os valores de altura significativa e período significativo em redor ao navio, para todas as condições de agitação ensaiadas. Seguidamente, efetuou-se a análise espectral dos mesmos dados que permitiram caracterizar: a) com recurso à transformada direta de Fourier, o período de pico da onda e a energia associada à frequência de pico; b) com recurso a wavelets, a variação das frequências e da respetiva densidade de energia espectral ao longo do tempo do ensaio.

Finalmente, analisaram-se os dados de velocidade recorrendo à análise temporal determinando a distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos  $xz$ ,  $xy$  e  $yz$  e valores mínimos,  $V_{\min}$ , e máximos,  $V_{\max}$ , dessas componentes da velocidade. Importa salientar que o recurso a medições de velocidade e posterior análise da velocidade, permite uma caracterização do fluxo de propagação da onda mais detalhado (velocidade, aceleração de partículas, coeficiente de reflexão, direção de incidência na estrutura, etc.) comparativamente com a caracterização obtida apenas com a análise de dados de elevação da

superfície livre. No entanto, a análise da elevação da superfície livre, por ser mais simples, apresenta vantagens e os dois métodos devem ser utilizados em conjunto.

As análises temporais e espectrais realizadas contribuem para um melhor conhecimento da hidrodinâmica da propagação das ondas e fornecem resultados importantes para caracterizar a radiação, difração e reflexão das ondas devidas à presença de um navio. Os resultados obtidos permitirão ainda a validação e calibração futura de modelos numéricos de comportamento de navios.

Apresenta-se, neste artigo, a descrição dos ensaios realizados e das análises efetuadas aos registos temporais das séries da elevação da superfície livre e das componentes da velocidade obtidas nos ensaios, recorrendo a técnicas de análises temporal e espectral. No final, são retiradas conclusões sobre os resultados obtidos nos testes experimentais e metodologias de análise.

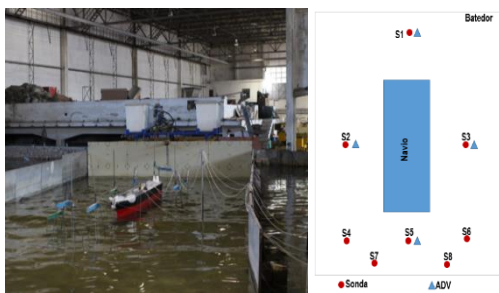
## 2. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

### 2.1 Condições experimentais

O objetivo principal dos ensaios foi caracterizar, para diversas condições de agitação regular e irregular incidente, a influência de um navio nas condições de agitação em redor do mesmo. Assim, efetuaram-se ensaios para várias condições de agitação incidente para as situações sem e com navio e procedeu-se à medição da elevação da superfície livre e das componentes da velocidade em diversos pontos. Os ensaios foram realizados no tanque 5 do Pavilhão de Hidráulica Marítima do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Fig. 1. A escala considerada foi de 1:50.

### 2.2 Equipamento e técnicas de medição

Para realização dos ensaios foram utilizados: 1 navio, 8 sondas resistivas e 2 velocímetros acústicos (ADV). O navio foi colocado a meio do tanque com proa perpendicular à pá do batedor, e as 8 sondas resistivas e os 2 velocímetros acústicos foram dispostos de acordo com a Fig. 1.



**Fig. 1** - Instalação experimental: esquema da posição do equipamento

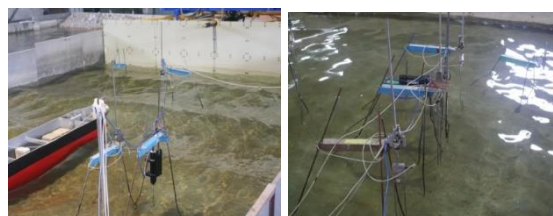
O modelo utilizado nestes ensaios é um modelo reduzido do navio Esso Osaka (petroleiro de grandes dimensões) cedido pelo CENTEC do IST. O comprimento total do navio é de 3.450 m e a sua largura é de 0.540 m. O navio foi pesado com uma balança digital. O peso total do navio é de 59.06 kg. Para simular uma condição de carga intermédia, foram colocados 8 blocos cúbicos de betão no interior do casco do navio com um peso total de 150 kg. O peso total do navio carregado (navio+blocos) é de 209.55 kg. As posições dos blocos foram registadas para o cálculo do centro de gravidade do navio.

As 8 sondas resistivas foram utilizadas para medição da elevação da superfície livre, com uma frequência de aquisição de 50 Hz. A sonda 1 serve para controlar a agitação que está a ser gerada pelo baterdor, enquanto as restantes sondas servem para caracterizar o campo de ondas em redor do mesmo. As sondas 2 e 3 estão colocadas sensivelmente a meio do navio. As sondas 4, 5, 6, 7 e 8 foram colocadas de forma a ser possível determinar a agitação na popa do navio, Fig. 1.

Para medir as velocidades 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 meio da coluna de água, com uma frequência de aquisição de 25 Hz. Os velocímetros foram colocados nas posições indicadas na Fig. 1, colocados junto às sondas, Fig. 2.

### 2.3 Condições de agitação incidente

Os ensaios, com uma duração de 300 s, foram realizados para um nível de água de



**Fig. 2** - Colocação do ADV junto às sondas.

45 cm, testando-se condições de agitação regular e irregular.

Foram realizados ensaios de agitação regular, para altura significativa de onda de 2.0, 4.0 e 6.0 m e períodos de onda de 8 s, 12 s e 16 s. No caso das ondas irregulares, efetuaram-se ensaios para altura significativa de onda de 4.0 e 6.0 m e períodos de pico de onda de 8 s, 12 s e 16 s. Neste caso, adotou-se um espectro de JONSWAP.

Foram ensaiadas todas as condições de agitação incidente com a presença do navio, o qual estava disposto perpendicularmente à direção de propagação das ondas. De seguida, os ensaios foram repetidos sem a presença do navio.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Metodologia

Para as diferentes condições de agitação ensaiadas realizou-se uma análise temporal (zero up-crossing) e espectral (transformada de Fourier e Wavelet), de acordo com Fortes et al. (2010) e Ramos et al. (2015), dos valores das séries de elevação da superfície livre para as 8 sondas e uma análise temporal das séries das componentes de velocidade nas 4 diferentes posições. Como referido, estas metodologias de análise permitem uma caracterização da propagação da onda mais detalhado.

A análise temporal das medições da elevação da superfície livre permitiu determinar a altura significativa,  $H_s$ , e o período significativo,  $T_s$ , das ondas para todas as condições de agitação ensaiadas (regular e irregular) em 8 pontos em redor do navio. Por outro lado, a análise espectral, recorrendo à transformada direta de Fourier,

permitiu determinar a altura significativa de onda,  $H_s$ , o período de pico da onda,  $T_p$ , e a energia associada à frequência de pico,  $S$ , para todas as condições de agitação ensaiadas. Para além disso, esta análise permite verificar a transferência de energia entre harmónicas devido às interações não lineares entre ondas. A análise espectral recorrendo aos wavelets permite complementar aquela informação e avaliar a variação da densidade espectral de energia ao longo do tempo.

Finalmente, efetuou-se, com base nas medições de velocidade, a distribuição bidi-mensional das componentes da velocidade nos planos  $xz$ ,  $xy$  e  $yz$  e a determinação dos valores mínimos,  $V_{min}$ , e máximos,  $V_{max}$ , das componentes da velocidade nas sondas S1 a S5 a meio da coluna de água para as condições de ondas regulares.

Nesta comunicação, apresentam-se apenas os resultados para uma condição de ensaio, referente ao período de pico de 8 s e uma altura significativa de onda de 4,0 m.

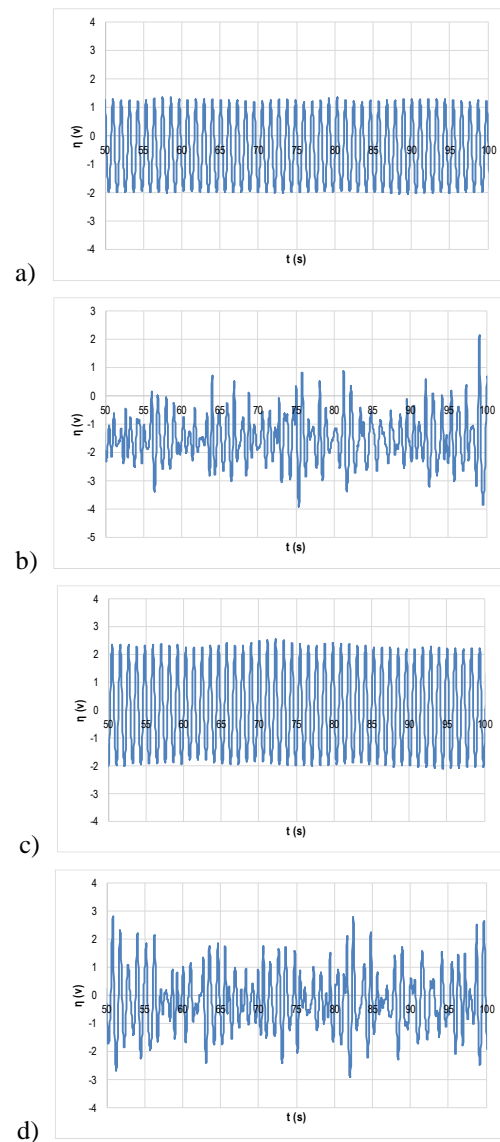
### 3.2 Análise temporal da elevação da superfície livre

Na Fig. 3 apresenta-se a série temporal de elevação da superfície livre na situação sem e com navio, para as situações de agitação regular e irregular, para a sonda S2.

Verifica-se nesta sonda (S2) um aumento da amplitude da onda, quer no caso de ondas regulares quer no caso de ondas irregulares. Na Fig. 4 são apresentados os valores de  $H_s$  e  $T_s$  para as condições de agitação regular e irregular, para as sondas S1, S2, S3 e S5.

Dos resultados obtidos é possível verificar que a presença do navio:

- Leva a alterações na série temporal da elevação da superfície livre quer para o caso de agitação regular como irregular e em ambos os casos, na sonda 2, verifica-se um incremento dos valores máximos e mínimos dessa variável;
- Tem influência em todas as sondas. Nas sondas 1, 2 e 3, esta influência é traduzida,



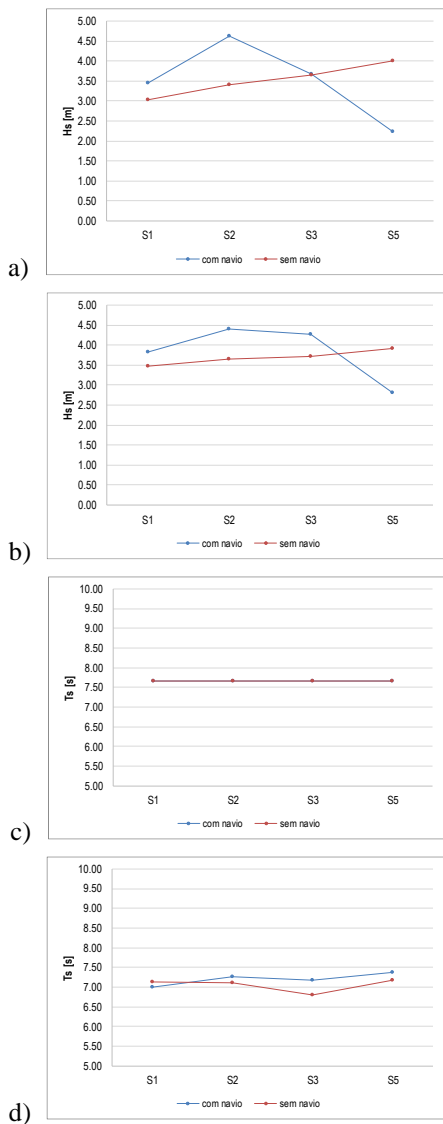
**Fig. 3** - Série temporal da elevação da superfície livre de onda na sonda S2: a) agitação regular sem navio; b) agitação irregular sem navio; c) agitação regular com navio; d) agitação irregular com navio

em geral, no aumento da altura de onda e é consequência de reflexões de onda no navio e possivelmente nas fronteiras do modelo físico;

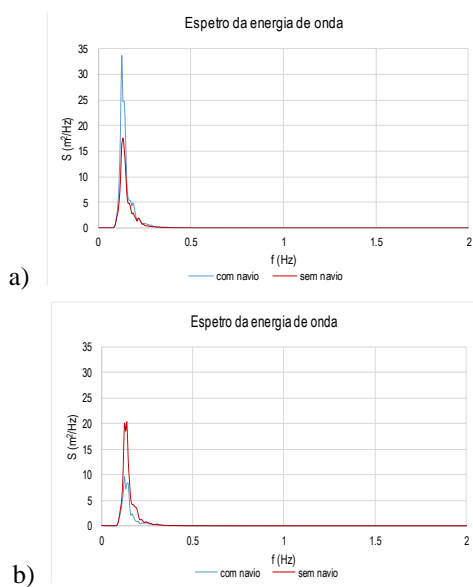
- Na sonda 5, a altura de onda diminui em virtude do abrigo que o navio exerce sobre esta sonda;
- Quanto ao período, não se verifica influência significativa do navio para condições de agitação regular ou irregular.

### 3.3 Análise espectral da elevação da superfície livre

No que diz respeito a esta análise e com recurso à transformada de Fourier, para a



**Fig. 4** - Altura significativa de onda: a) agitação regular; b) agitação irregular; Período significativo de onda: c) agitação regular; d) agitação irregular.

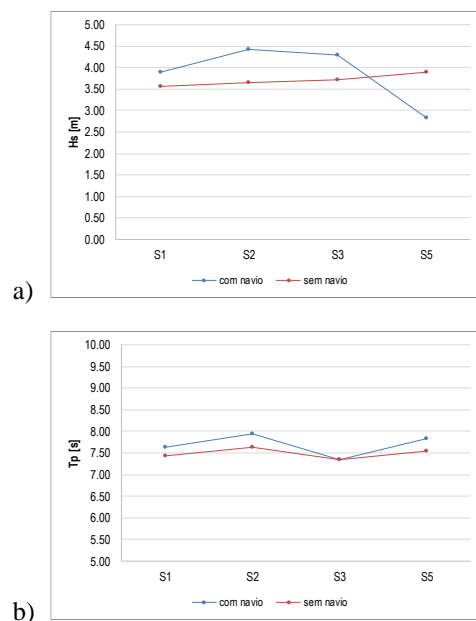


**Fig. 5** - Análise espectral (Transformada de Fourier): espectro de energia com e sem navio  
a) Sonda S2; b) Sonda S5

condição de ensaio de agitação irregular  $T_p = 8$  s e  $H_s = 4.0$  m, apresentam-se os resultados do espectro de energia, Fig. 5, para a sonda S2, e de altura significativa e período de pico, Fig. 6, para as sondas S1, S2, S3 e S5.

Da análise espectral realizada, Fig. 5, verifica-se que, a presença do navio contribui para um aumento da energia do espectro associada ao período de pico na sonda S2, devido às reflexões que acontecem no casco do navio enquanto na sonda S5, dá-se o contrário devido ao facto de estar na zona protegida pelo navio. Da Fig. 6, confirmam-se os resultados obtidos com a análise temporal, i.e., a presença do navio tem influência na sonda 5 havendo diminuição da altura de onda, pois serve de proteção à mesma, enquanto nas sondas 1, 2 e 3 existe um aumento da altura de onda, consequência de reflexões no navio e, possivelmente, re-reflexões nas fronteiras do modelo físico. Quanto ao período de pico, o mesmo é praticamente constante para as 4 sondas, sofrendo um ligeiro aumento quando o navio se encontra presente.

A análise espectral dos valores da elevação da superfície livre, com recurso à técnica de wavelets, permitiu avaliar a distribuição ao longo do tempo da energia associada a cada frequência do espectro, nas sondas, S1, S2, S3 e S5, para a situação sem e com navio.



**Fig. 6** - Análise espectral (transformada de Fourier), para as sondas S1, S2, S3 e S5. Valores de a)  $H_s$ ; b)  $T_p$



Na Fig. 7 apresentam-se os wavelets para os casos sem e com navio, na sonda S2 a 2D e a 3D. Como se pode verificar, a distribuição e a magnitude da densidade de energia espectral para as diferentes frequências apresenta um comportamento diferente para a situação sem e com navio, sendo notória a maior relevância das harmónicas no caso com navio. Na Fig. 8 apresentam-se os wavelets para o caso com navio nas 4 sondas. Verifica-se que existe uma predominância na frequência de pico onde ocorre a densidade de energia espectral máxima, em todas as sondas. A maior energia está associada à sonda S2 enquanto a menor está associada à sonda S5. Em cada sonda, o valor máximo da densidade de energia espectral ocorre em instantes distintos. Note-se que a energia associada a cada frequência não é constante ao longo do tempo, mesmo a associada à frequência principal.

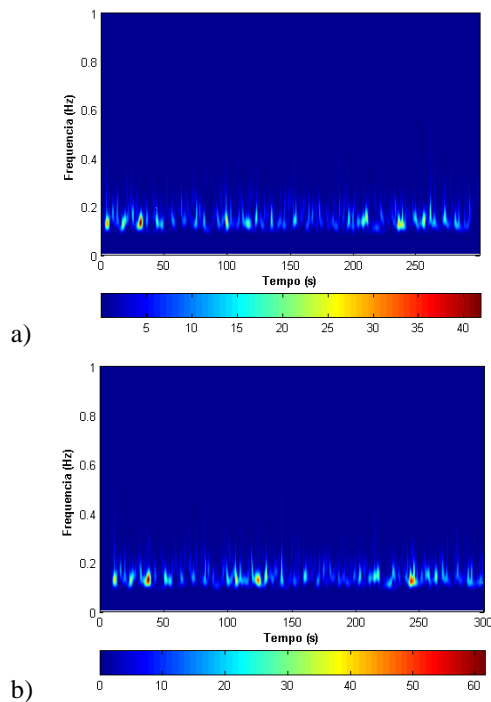


Fig. 7 - Análise espectral (wavelets) na sonda S2:  
a) Sem navio; b) Com navio

### 3.4 Análise temporal das componentes da velocidade

Com base na medição das componentes das velocidades pelo ADV, foi possível determinar a distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos xz, xy e yz para as condições de ondas regula-

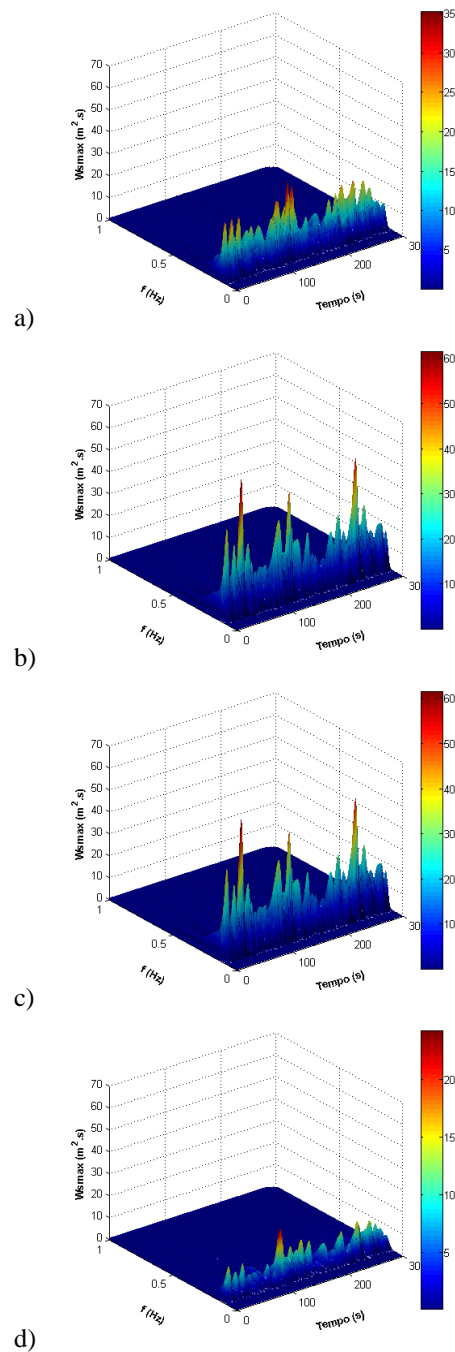


Fig. 8 - Situação com navio. Análise espectral (wavelets) nas sondas: a) S1; b) S2; c) S3; d) S5

res, Fig. 9. Verifica-se uma forma aproximadamente elíptica das componentes de velocidade em todas as sondas com maior dispersão nas sondas S2 e S3 (e menor nas sondas S1 e S5), o que indica a presença de reflexões, ou seja, ondas que vêm de direções diferentes. Na sonda S5, a velocidade vertical das partículas reduz-se devido à proteção do navio.

Os valores mínimos,  $V_{min}$ , e máximos,  $V_{max}$ , das componentes da velocidade nas

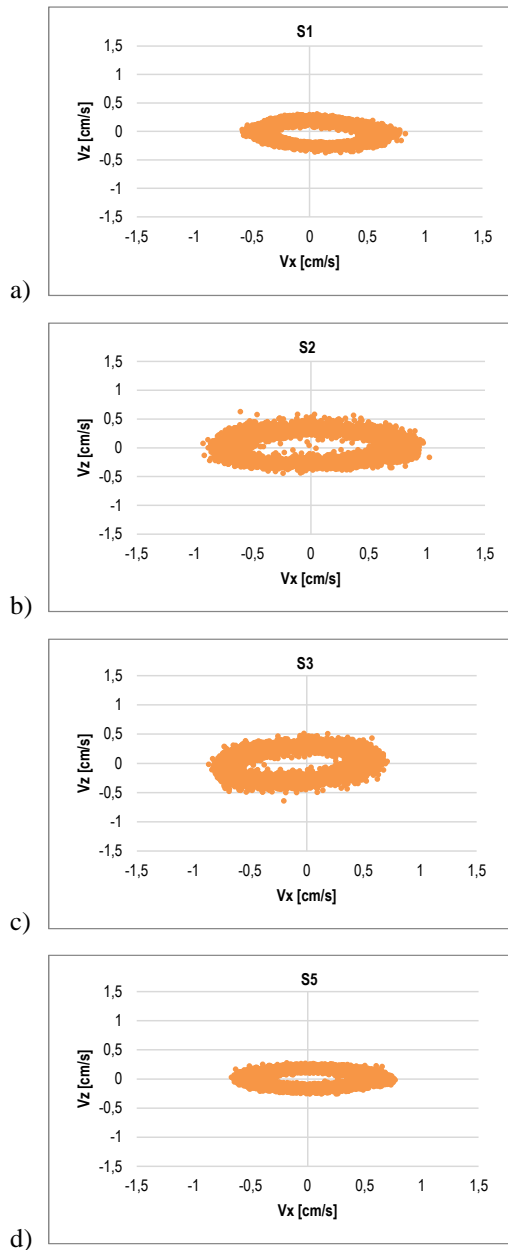


Fig. 9 - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano xz

sondas S1 a S5 a meio da coluna de água são apresentados na Fig. 10 e correspondem, respetivamente, às médias dos valores mínimos e máximos das componentes da velocidade.

Da análise realizada é possível verificar que:

- $V_x$  é simétrico na situação sem navio apresentando uma ligeira assimetria na situação com navio. Os valores diferem ligeiramente nas diferentes situações principalmente para a sonda S5;
- $V_y$  é praticamente semelhante em todas as sondas para a situação com e sem navio, apresentando um comportamento simétrico;

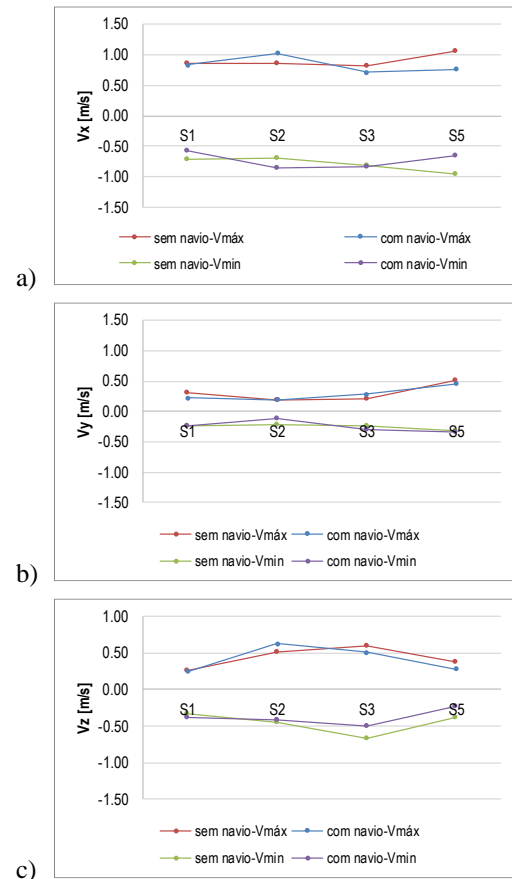


Fig. 10 -  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  das componentes da velocidade com navio e sem navio: a)  $V_x$ ; b)  $V_y$ ; c)  $V_z$

- $V_z$  é simétrico nas situações sem e com navio, apresentando valores semelhantes nas sondas S1 e S2 e com ligeiras diferenças nas sondas S3 e S5.

#### 4. CONCLUSÕES

A presente comunicação tem como objetivo principal caracterizar a influência de um navio nas condições de agitação em seu redor, nomeadamente através da medição da elevação da superfície livre e das componentes da velocidade em diversos pontos e para diversas condições de agitação regular e irregular incidente.

A presença do navio tem influência nos valores registados nas sondas, havendo, em geral, um aumento das alturas de onda registadas em pontos junto ao navio. Este aumento deve-se às reflexões que ocorrem no casco do navio e às ondas radiadas pelo movimento deste. Na sonda colocada atrás da popa do navio as alturas são naturalmente menores devido ao abrigo

conferido pelo próprio navio. A mesma tendência ocorre quer para ondas regulares quer para ondas irregulares. No que diz respeito ao período significativo de onda, não se verifica influência do navio.

A análise espectral permitiu verificar que não existem interações não lineares significativas nem o aparecimento de ondas longas, ou seja, a frequência de pico manteve-se assim como a forma do espectro, havendo apenas aumento ou diminuição da energia associada à frequência de pico. A análise de wavelets indica uma variação ao longo do tempo na amplitude significativa, mas não na forma do espectro.

A análise das velocidades registadas a meio da coluna de água permitiu observar a forma elíptica das trajetórias e uma maior dispersão em termos de direções nas sondas junto ao navio, resultado das reflexões no casco e das ondas radiadas a partir deste.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CENTEC - Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica pela cedência do modelo do navio utilizado e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. pelo financiamento concedido através do projeto “M&M Ships - Navios em Manobra e Amarrados em Portos.

Modelação física e numérica”, com referência PTDC/EMSTRA/5628/2014.

Por fim, agradece-se à Técnica superior Rosa Emília Soares a ajuda nos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- Fortes, C.J.E.M.; Pinheiro, L.; Santos, J.A. (2010) - Análise temporal, espectral e de erros no pacote SOPRO. Aplicações. 10º Cong. da Água, Alvor.
- Ramos, A.; Fortes, C.J.E.M. (2015) - Programa de análise espectral utilizando a função Wavelet. Rel. LNEC 374/2015.
- Ramos, A; Fortes, C.J.E.M; Conde, J.M.P; Gabriel, S; Reis, R – “Modelação física em canal da propagação de ondas na Praia da Galé, Algarve”, Actas das 4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 21-23 de junho de 2016, pp 463-466.