

# Extensão do molhe norte do Porto de Leixões: modelação física de um navio amarrado no posto A

## *Leixoes north breakwater extension: physical modelling of a moored ship at berth A*

Liliana V. Pinheiro<sup>1</sup>, Francisco Pedro<sup>2</sup>, Hossam S. Abdelwahab<sup>3</sup>, Conceição J.E.M. Fortes<sup>4</sup>, João A. Santos<sup>5</sup> e Rui Capitão<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, lpinheiro@lnec.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, fpedro@lnec.pt

<sup>3</sup> Centre for Marine Technology and Ocean Engineering, IST, Lisboa, Portugal, hossam.abdelwahab@centec.tecnico.ulisboa.pt

<sup>4</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, jfortes@lnec.pt

<sup>5</sup> ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa e Centre for Marine Technology and Ocean Engineering, IST, Lisboa, Portugal, jasantos@dec.isel.ipl.pt

<sup>6</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, rcapitao@lnec.pt

**RESUMO:** O Porto de Leixões, localizado na costa norte de Portugal, é um dos maiores do país, recebendo diariamente vários navios de grandes dimensões. Um dos principais postos de acostagem situa-se à entrada do porto e encontra-se sujeito à agitação marítima que é difratada pelo olhe principal de proteção do porto. Para avaliar dos movimentos induzidos no navio estacionado nesse posto de acostagem e as forças exercidas nas suas amarras e defensas pela agitação incidente, utilizou-se o modelo físico de Leixões, construído num dos tanques do LNEC. Neste modelo físico, encontra-se representada a envolvente do porto de Leixões, assim como a sua batimetria. O modelo do navio “Esso Osaka” tem um comprimento de 3,43 m, uma boca de 0,53 m e um calado máximo de 0,23 m. A medição da elevação da superfície livre foi realizada com um conjunto de sondas resistivas. Os movimentos do “Esso Osaka” foram medidos segundo os seis graus de liberdade com recurso a um Sistema ótico de medição de movimentos, Optitrack™. Efetuou-se ainda a determinação das forças nas amarras e defensas com recurso a células de carga. Foram efetuados um conjunto de ensaios com o navio “Esso Osaka” para diferentes períodos de onda e alturas de onda incidente. Neste artigo descrevem-se os ensaios realizados e os resultados obtidos.

Palavras-chave: modelo físico; navio amarrado; relações constitutivas; medição movimentos.

**ABSTRACT:** The Port of Leixões, located on the north coast of Portugal, is one of the largest in the country, receiving several large ships daily. One of its main berths is located at the entrance of the port and is subject to the maritime agitation that is diffracted by the main breakwater. In order to evaluate the incident agitation induced ship movements and the forces on its moorings and defences, a scale model of the port was built in one of the LNEC wave tanks. In this physical scale model, the surroundings of the port of Leixões are represented, as well as its bathymetry. A model of a tanker ship, “Esso Osaka”, was also placed in the tank, moored to berth A. The ship’s model has a length of 3.43m, a beam of 0.53m and a maximum draft of 0.23m. Measurements included: free surface elevation, using a set of resistive probes; movements according to the six degrees of freedom of the ship using an optic motion capture system, Optitrack™; forces in the mooring lines and fenders, using load cells. A set of tests were carried out with the “Esso Osaka” vessel for different wave periods and incident wave heights. This paper describes the tests performed and the results obtained.

Keywords: scale model; moored ship; constitutive relations; motions measurement.

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo descreve o estudo experimental do comportamento de um petroleiro amarrado no porto de Leixões. Este é um dos principais portos marítimos portugueses, localizado a 4 km a norte da foz do rio Douro, no município de Matosinhos, perto da cidade do Porto, recebendo grandes navios quase diariamente. Apresenta-se na Figura 1 a configuração atual do porto de Leixões, com as suas principais instalações. O porto de Leixões é um dos portos mais expostos ao clima severo de agitação marítima que atingem a costa oeste portuguesa. Durante as tempestades, as alturas de onda significativas podem exceder os 8 m e os períodos médios das ondas podem estar na faixa de 16 a 18 s, com as tempestades persistindo por até 5 dias (ROSA-SANTOS *et al.*, 2010).

O terminal de petroleiros, atualmente explorado pela Galp Energia, é usado principalmente para carregar e descarregar petróleo bruto e produtos refinados. Localiza-se ao longo do quebra-mar norte e, com um comprimento de 1,6 km, possui três postos, sendo o posto "A", "B" e "C" como mostra a Figura 1. O posto "A", localizado próximo à cabeça do quebra-mar norte, à entrada do porto de Leixões, é submetido às ondas do mar difratadas pelo quebra-mar. De notar que interrupções nas operações de carga e descarga no posto A são comuns devido a movimentos excessivos dos navios aí amarrados.

Para a proteção do terminal e para permitir a amarração de navios maiores (até 300 m de comprimento) foi realizado um conjunto de estudos, utilizando simulações numéricas e ensaios físicos, para avaliar o impacto nas condições das ondas do

mar dentro do porto. aumentando o comprimento do quebra-mar norte em 300 m (NEVES *et al.*, 2017). Um modelo reduzido do porto de Leixões foi construído no LNEC como apresentado na Figura 2 e na Figura 3, tendo nele sido estudadas várias condições de agitação marítima incidente para três diferentes profundidades de água.

Após este estudo, e porque o modelo reduzido da nova estrutura ainda estava disponível, decidiu-se estudar o comportamento de um navio amarrado no posto "A" submetido a agitação marítima. O objetivo foi caracterizar o campo de ondas ao redor do navio amarrado, os movimentos do navio e os esforços nos elementos do sistema de amarração (amarras e defensas). Um estudo semelhante com uma representação esquemática do porto foi realizado por Rosa-Santos *et al.* (2010) sem aumentar o comprimento do quebra-mar norte.

Os ensaios do modelo reduzido foram realizados com o modelo de navio petroleiro denominado "Esso Osaka". Vários valores de condições de agitação marítima incidente (altura de onda significativa,  $H_s$  e período de pico,  $T_p$ ), para a direção oeste, e para o nível médio de água foram testados. Um conjunto de diferentes equipamentos e métodos de medição foi utilizado para caracterizar as diferentes variáveis. A elevação da superfície livre foi medida com um conjunto de sondas resistivas. As componentes das velocidades das ondas foram medidas com um Velocímetro Acústico por efeito de Doppler (ADV), localizado na entrada do porto. Os movimentos do modelo "Esso Osaka" segundo cada um dos seis graus de liberdade foram medidos com o sistema ótico de captura de movimento OptiTrack™. As forças em defensas e amarras foram medidas com



**Figura 1.** Porto de Leixões, Localização dos postos A, B e C do terminal de petroleiros do porto de Leixões (adaptado de Google Earth).

células de carga ligadas a um complexo sistema de molas desenvolvido no LNEC para simular as relações constitutivas dos elementos de amarração. Este artigo apresenta as medições realizadas num conjunto de ensaios preliminares projetados para explorar as capacidades dos equipamentos e procedimentos de ensaio disponíveis. Após esta introdução, a configuração do modelo físico, o equipamento utilizado e o procedimento de ensaio são apresentados. Depois, como exemplo, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos em cada equipamento, para a condição de agitação marítima incidente com  $H_s = 6$  e  $T_p = 14$  s.

## 2. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

O principal objetivo dos ensaios em modelo reduzido é caracterizar o campo de ondas em vários locais do porto, os movimentos do modelo de um navio amarrado no posto "A" do porto de Leixões e as forças nas amarras e nas defensas.

### 2.1 0 modelo físico

Os ensaios foram realizados num tanque, com 23 m de comprimento e 22 m de largura, do pavilhão de hidráulica marítima do núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do LNEC, como mostra a Figura 2.

O modelo físico do porto de Leixões foi construído e operado de acordo com a lei de semelhança de

Froude, com uma escala geométrica de 1:80, para garantir efeitos de escala reduzidos (com alturas de onda que levam a valores do número de Reynolds superiores a  $3 \times 10^4$ ). A configuração estudada do porto de Leixões já incluiu a nova extensão do quebra-mar do Norte, como mostra a Figura 2.

### 2.2 Equipamento de medição

O equipamento de medição usado nos ensaios incluiu: um modelo reduzido do navio-petroleiro "Esso Osaka", oito sondas resistivas, um Velocímetro acústico por efeito de Doppler (ADV), o sistema de captura de movimento OptiTrack™, seis células de carga e uma câmara de ação (tipo GoPro™).

Para monitorizar, registrar e sincronizar os sinais das sondas e do ADV, foi utilizado um módulo CompactRIO da National Instruments, usando o LabVIEW®. A localização do equipamento é apresentada na Figura 2 e na Figura 3.

#### 2.2.1 Modelo do navio

O modelo do navio-petroleiro "Esso Osaka" utilizado durante o conjunto de ensaios tem um comprimento de 3,43 m, uma largura de 0,54 m, um calado de 0,135 m e um pontal de 0,23 m. O modelo "Esso Osaka" estava amarrado perto do Posto A, quase paralelo ao lado mais comprido do tanque, como se mostra na Figura 3.

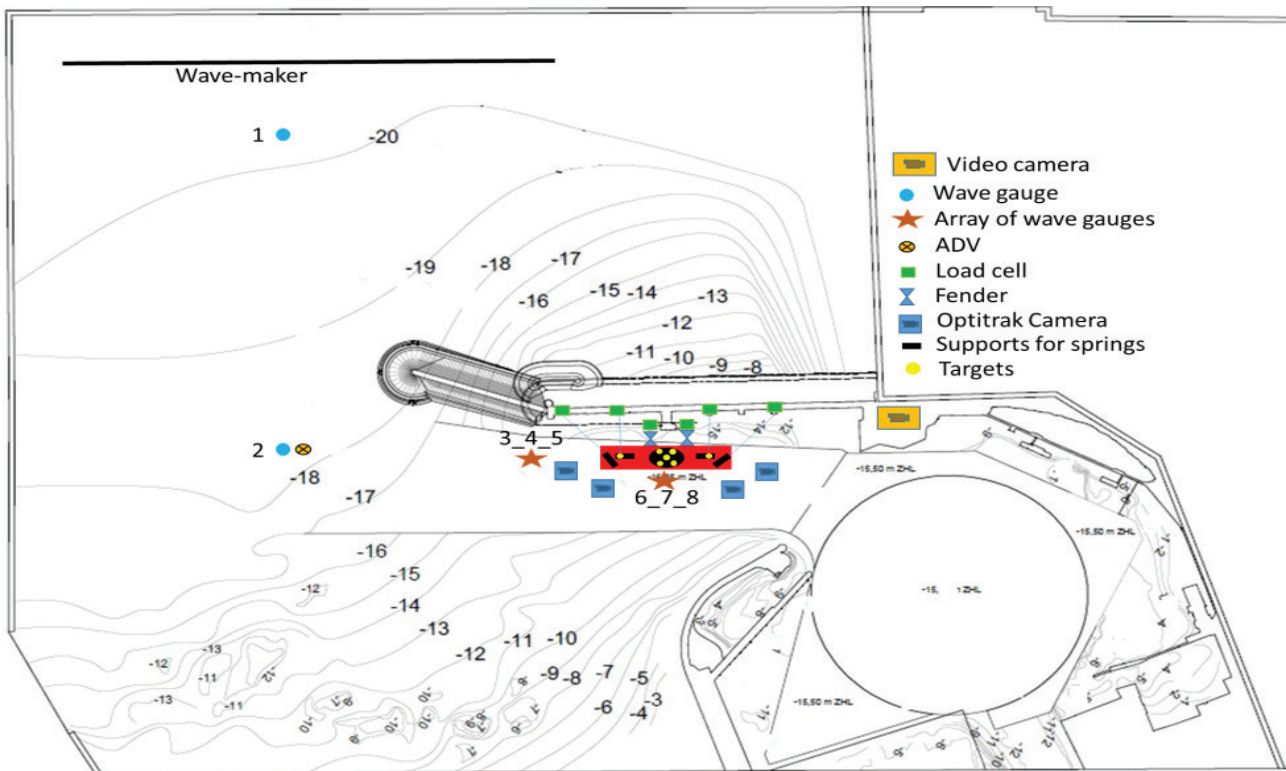


Figura 2. O modelo físico e localização dos equipamentos.

O peso leve do modelo “Esso Osaka” (apenas a estrutura do casco), medido com uma balança digital, é de 56,06 kgf. Para simular uma condição de carga intermédia, 8 blocos cúbicos de betão, com um peso total de 152,65 kgf, foram colocados dentro do casco do navio. O peso total do casco do navio-conjunto + blocos de betão + equipamento foi de 214,15 kgf.

Foram realizados ensaios de inclinação, para avaliar a altura metacêntrica e o centro de gravidade para um calado do modelo de 0,135 m, bem como ensaios de decaimento, para avaliar o período natural de rolo e cabeceio do modelo. Os ensaios decorreram com o modelo numa zona com a profundidade de 23,75 cm (na escala do modelo).

### 2.2.2 Sondas resistivas e ADV

As 8 sondas resistivas mediram a elevação da superfície livre com uma frequência de amostragem de 25 Hz. Elas foram usadas para caracterizar o campo de ondas (altura, período e direção) em diferentes locais do tanque, nomeadamente, na entrada do porto, em frente à proa do navio e próximo ao navio amarrado. As 8 sondas resistivas foram implantadas como mostrado na Figura 4. Elas foram divididas em três grupos principais: uma sonda (1) perto do gerador de ondas, para verificar

as características da agitação marítima incidente; outra sonda (2) na entrada do porto (junto do ADV) para caracterizar a altura e direção da onda; dois grupos de três sondas (3, 4 e 5 e 6, 7 e 8), como mostrado na Figura 4b, um em frente ao navio e um junto ao bordo do navio, perto do seu centro de gravidade. Esses dois grupos deram informações sobre as alturas e as direções da agitação marítima junto ao navio.

Para medir a velocidade do escoamento associado à passagem das ondas na entrada do porto, instalou-se um ADV junto à sonda (2), como mostrado na Figura 4a. Este ADV pode medir as componentes da velocidade ao longo de cada um dos três eixos (x, y e z) 6 cm abaixo do nível de repouso da superfície livre, com uma frequência de amostragem de 25 Hz.

### 2.2.3 OptiTrack™

O OptiTrack é um sistema de captura de movimento pré-calibrado com múltiplas câmaras baseado num conjunto de alvos. O OptiTrack é conhecido pela sua alta precisão e capacidade de processamento (THEWLIS *et al.*, 2013). Ele pode seguir marcadores com uma precisão sub-milimétrica e calcular séries temporais dos seis graus de liberdade dos movimentos de um corpo rígido.

Nestes ensaios utilizou-se uma configuração com



Figura 3. Navio “Esso Osaka” e equipamentos de medição.

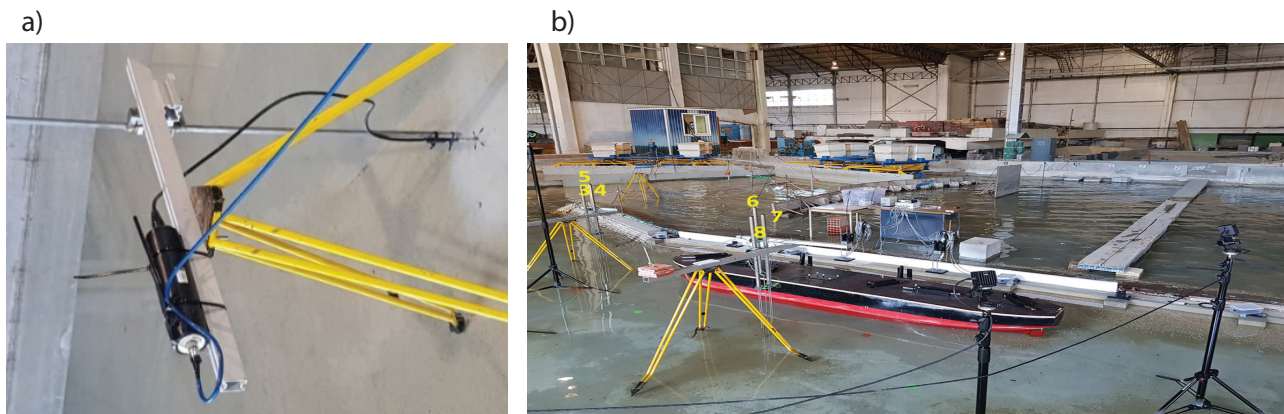


Figura 4. a) ADV; b) Grupos de sondas resistivas (3, 4 e 5 e 6, 7 e 8).

4 câmaras de deteção de movimento, instaladas em 4 tripés, para capturar os movimentos do navio amarrado, seguindo o movimento de cinco pontos-alvo que descrevem o movimento do corpo rígido. Um exemplo dessas câmaras pode ser visto na Figura 5.

Outros 2 alvos localizados na proa e na popa do navio também foram seguidos usando o sistema para verificar a precisão das medições. O Motive™, software proprietário do OptiTrack™, foi usado para registar os resultados. O sistema é capaz de capturar com precisão os movimentos do navio nos seis graus de liberdade: avanço, deriva, abatimento, rolo, cabeceio e guinada. As quatro câmaras foram colocadas em torno do navio. A frequência

de aquisição foi de 50 Hz. A Figura 6 apresenta a disposição dos elementos do sistema OptiTrack™. Antes de iniciar uma série de ensaios é necessário estabelecer o plano horizontal definidor do sistema de coordenadas global. Para tal, utiliza-se um alvo padrão com três marcadores coplanares. Para calibrar o sistema OptiTrack™, utiliza-se um alvo móvel com 3 marcadores colineares em frente da área de medição das câmaras que é movimentado de forma aleatória. A redundância das 4 câmaras vai possibilitando a correção dos erros de medição até se atingir a precisão desejada. Um dos cuidados a ter antes dos ensaios é o de minimizar e evitar o reflexo de luzes na superfície da água, para evitar que estes sejam interpretados como alvos.



**Figura 5.** Componentes do Sistema OptriTrack.



**Figura 6.** Disposição do Sistema OptiTrack.

#### 2.2.4 Amarras e defensas

O modelo do navio está amarrado com quatro amarras e duas defensas, como mostra a Figura 7. As defensas foram simuladas com um sistema de alavanca em que uma extremidade encosta ao bordo do modelo do navio e a outra é ligada através de um cabo rígido a uma mola não linear, pré-calibrada de modo a simular a relação carga-deflexão da defesa simulada, Figura 8. O mesmo sistema de mola simula a relação força-extensão das amarras. Os esforços nos elementos do sistema de amarração são então medidos com seis células de carga ligadas aos cabos rígidos associados a cada um daqueles elementos.

O sistema de mola não linear foi obtido com uma lâmina de aço embutida num suporte onde são colocados vários parafusos progressivamente de tal maneira que o comprimento entre o parafuso e a ponta da lâmina é capaz de impor a curva desejada de força-deslocamento (Marcos-Rita, 1984). A localização dos parafusos foi ajustada num processo de calibração onde pesos conhecidos são pendurados na extremidade livre da lâmina e sendo o deslocamento dessa extremidade imposto pela relação constitutiva do elemento do sistema de amarração correspondente.

Pretendeu-se que o sistema de amarração fosse

aproximadamente simétrico em relação ao centro do navio. Resultou assim um sistema com dois lançantes, um a vante com aproximadamente 1,90 m de comprimento, outro à ré com 1,60 m e dois traveses com aproximadamente 0,75 m. Além disso, foram consideradas duas defensas cujos pontos de contacto a estibordo estão a cerca de 0,55 m do centro do navio. Procurou-se reproduzir nos ensaios com modelo físico as relações constitutivas das amarras consideradas num estudo realizado no LNEC (SANTOS 2005) de simulação numérica de um navio de dimensões semelhantes ao agora considerado atracado no posto A do terminal de petroleiros do porto de Leixões. Essas amarras eram constituídas pela junção em série de um cabo de aço com um cabo de fibra sintética. Partindo das relações tensão-extensão para estes cabos obtiveram-se as relações força-alongamento para os três comprimentos de amarra utilizados nestas experiências. Para a simulação das duas defensas pneumáticas utilizou-se apenas os resultados da semelhança de Froude para escalar diretamente as relações força-deflexão consideradas no mesmo estudo. Na Figura 9 apresentam-se essas relações constitutivas bem como os valores obtidos na calibração das molas que representam dois elementos do sistema de amarração.



Figura 7. Defensas e amarras.

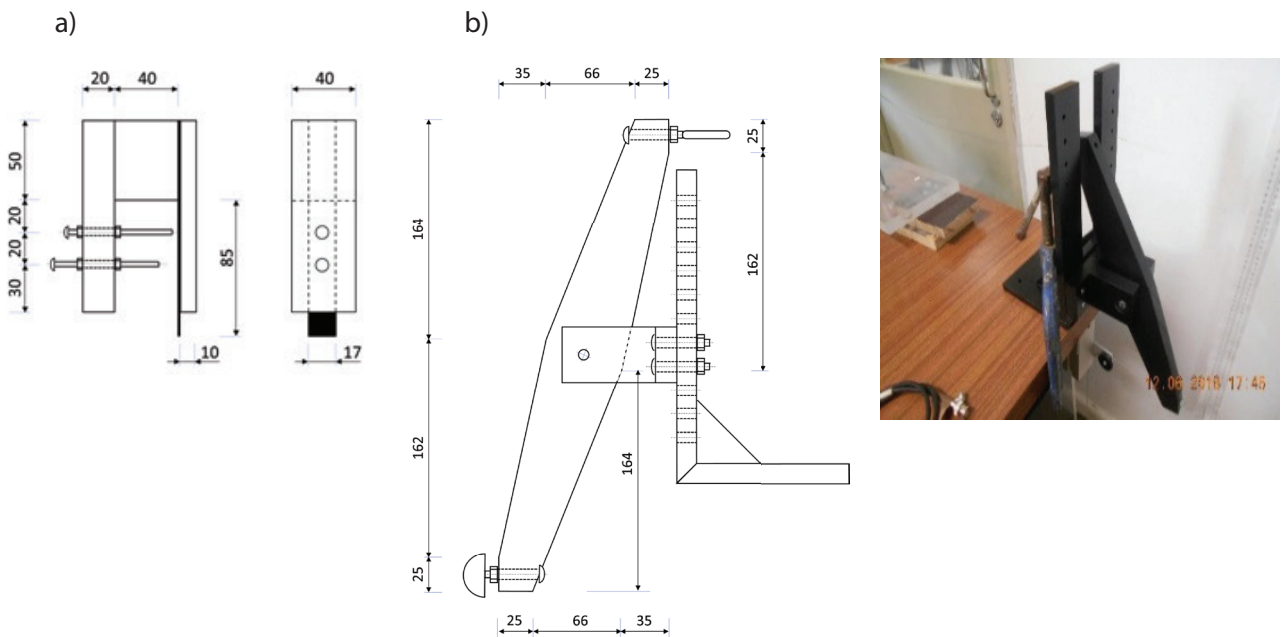
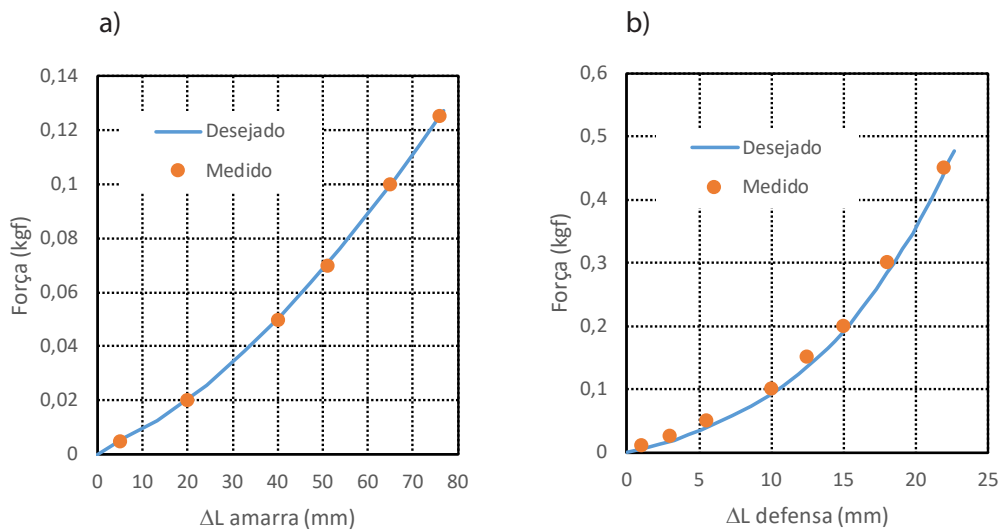


Figura 8. - a) Sistema de modelação das amarras, b) Sistema de modelação das defensas (medidas em mm).



**Figura 9.** Relações constitutivas pretendidas e simuladas para a) amarra de vante, b) defesa de vante

### 2.3 Condições de ensaio

As condições de ensaio são mostradas na Tabela 2, em que  $H_s$  representa a altura significativa da agitação marítima gerada e  $T_p$  é o período de pico do espectro JONSWAP, com um fator de aumento de pico de 3.3, considerado na geração dessa agitação marítima. A duração de cada ensaio foi tal que garantisse a incidência de pelo menos 1000 ondas, variando entre 1500 e 2400s conforme o período de pico simulado. A direção da onda incidente foi W. Todos os ensaios foram repetidos uma vez. Os ensaios 4, 5, 6 e 9 foram repetidos 10 vezes. Um total de 48 ensaios foram realizados.

**Tabela 2.** Condições de ensaio (em frente ao quebra-mar).

Ensaio	Protótipo		Modelo	
	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (cm)
1	10	3.0	1.34	3.75
2	10	4.0	1.34	5.00
3	10	6.0	1.34	7.5
4	14	3.0	1.57	3.75
5	14	4.0	1.57	5.00
6	14	6.0	1.57	7.5
7	16	3.0	1.79	3.75
8	16	4.0	1.79	5.00
9	16	6.0	1.79	7.5

Nos ensaios realizados foi introduzida uma pré-tensão no sistema de amarração impondo uma deformação na mola ligada a cada elemento

daquele sistema, isto é, impondo uma dada força na célula de carga correspondente. Após cada ensaio, com o navio em repouso, retirava-se a pré-tensão nas células de carga de forma a confirmar sempre os zeros das medições.

A calibração/determinação das inércias do navio (que dependem da distribuição de massas) foi feita recorrendo a ensaios de decaimento para as oscilações de rolo e cabeceio. Esses ensaios foram realizados a priori em condições de água paradas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por razões práticas, apenas um dos ensaios é apresentado em detalhe neste documento. O ensaio escolhido foi o Ensaio 6, para condição de agitação marítima incidente com  $T_p = 1,57$  s e  $H_s = 7,5$  cm ( $T_p = 14$  s e  $H_s = 6$  m no protótipo). Os dados e resultados correspondentes são apresentados e discutidos.

### 3.1 Alturas de onda e direções

A análise espectral das séries de elevação de superfície livre, com base apenas no módulo da transformada rápida de Fourier de cada uma das séries medidas, forneceu as alturas significativas e os períodos de pico mostrados nas primeiras duas linhas da Tabela 3. Aí pode confirmar-se o decréscimo da altura significativa do estado de agitação à medida que este se propaga ao longo do canal de navegação.

Com as séries temporais da elevação da superfície livre na sonda 2 e das componentes da



**Tabela 3.** Ensaio 6. Características da agitação marítima.

	Parâmetro	Sonda							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Análise espectral (ondas incidentes e refletidas)	$H_s$ (cm)	6,212	4,286	1,156	1,173	1,16	1,143	1,087	1.008
	$T_p$ (s)	1,531	1,492	1,796	1,754	1,753	1,764	1,716	1,715
Espectro direcional (apenas ondas incidentes)	$H_s$ (cm)	-	4,66		1,3			1,08	
	$T_p$ (s)	-	1,46		1,47			1,46	
	Dir(°)	-	22 (+ADV)		134			141	

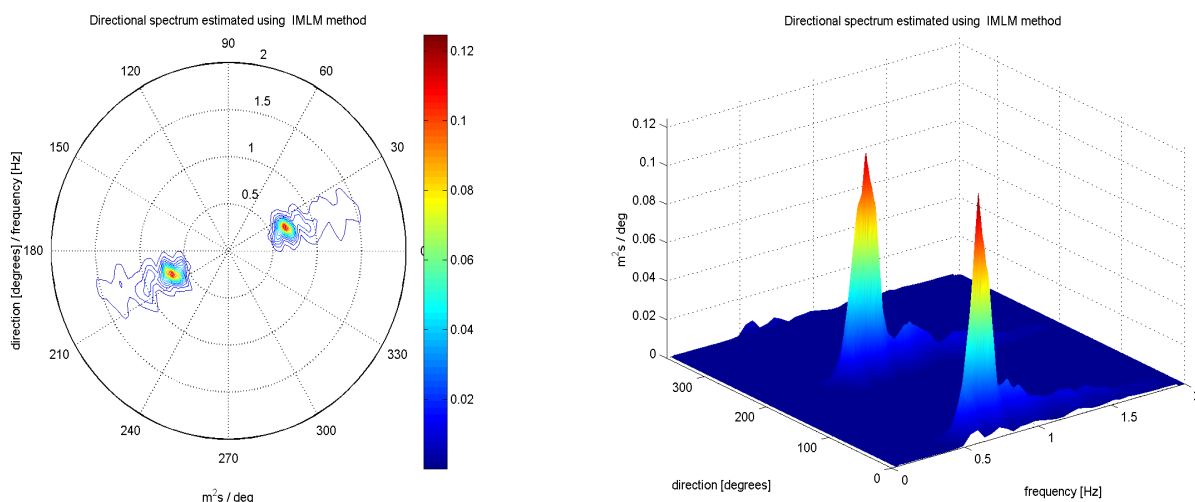
velocidade medida no ADV próximo dessa sonda e utilizando o procedimento de IMLM: Iterated Maximum Likelihood Method (Isobe *et al.* 1984 e Pawka 1983) implementado no pacote DIWASP (JOHNSON, 2002) foi possível estimar o espectro bidimensional na zona da cabeça do quebra-mar. Nesse espectro, Figura 10, é possível separar as componentes do estado de agitação de acordo com suas direções e, assim, identificar a agitação incidente e refletida. Nas últimas 3 linhas da Tabela 3 na coluna relativa à sonda 2, apresenta-se o resultado do processamento da informação relativa ao estado de agitação incidente.

O mesmo procedimento de estimação do espectro bidimensional foi aplicado ao conjunto de sondas 3\_4\_5 (Figura 11a) e ao conjunto 6\_7\_8 (Figura 11b) Os valores correspondentes da altura significativa, período de pico e direção média do período de pico dos estados de agitação incidentes são também apresentados nas 3 últimas linhas da Tabela 3.

### 3.2 Movimentos do navio

A Figura 12 mostra as séries temporais no Ensaio 6 da translação ao longo dos eixos X, Y e Z (avanço, deriva e abatimento) do centro de gravidade de “Esso Osaka”, enquanto na Figura 13 pode observar-se as séries temporais dos movimentos de rolo, cabeceio e guinada. Em ambos os casos, trata-se do registo direto do OptiTrack™ no intervalo dos 400 s aos 500 s. Como se pode ver, os movimentos do navio no plano horizontal estão principalmente na direção X (eixo longitudinal do navio) e menores na direção Y (eixo da transversal), ou seja, o movimento de translação é maior do que o movimento oscilante. Na direção Z (movimento vertical), o movimento do navio é muito pequeno em comparação com os movimentos horizontais.

Quanto aos movimentos de rolo, cabeceio e guinada, têm amplitudes semelhantes, mas frequências diferentes. A Tabela 4 mostra os valores mínimo e máximo, bem como as amplitudes totais são apresentadas para cada grau de liberdade.

**Figura 10.** Espectro bidimensional na zona da cabeça do quebra-mar. Ensaio 6.

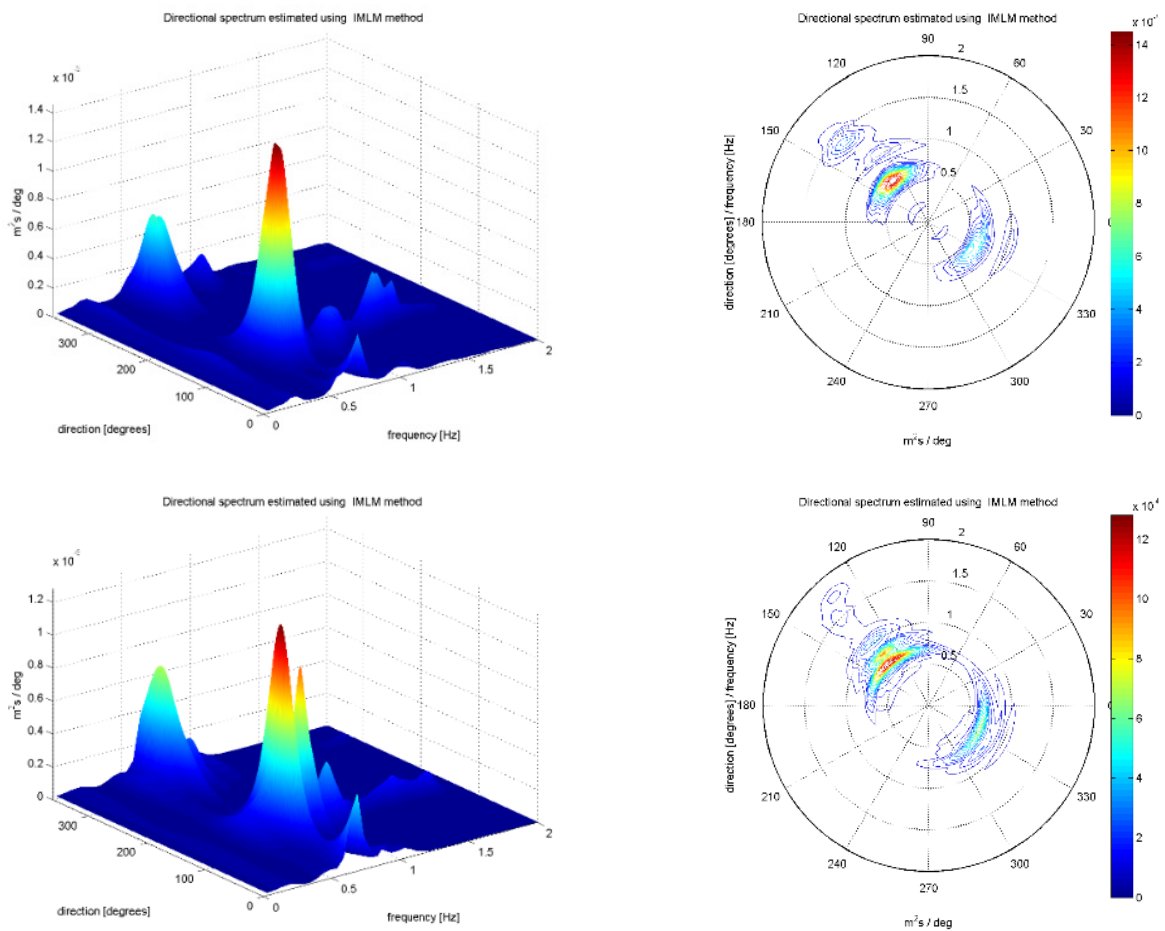


Figura 11. Espectros direcionais nos conjuntos de sondas. Ensaio 6: a) 3\_4\_5; b) 6\_7\_8.

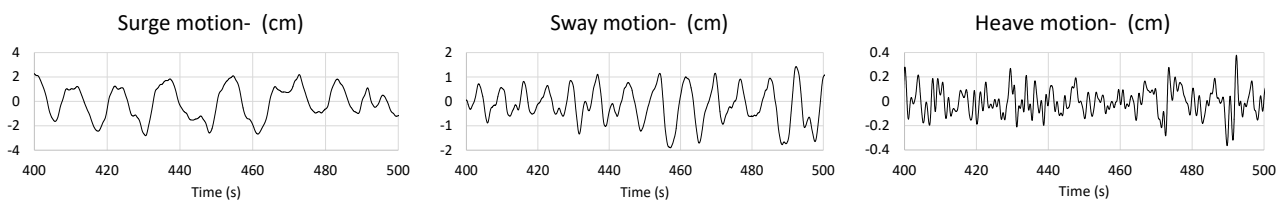


Figura 12. Séries temporais para os movimentos de translação do modelo “Esso Osaka”. Ensaio 6.

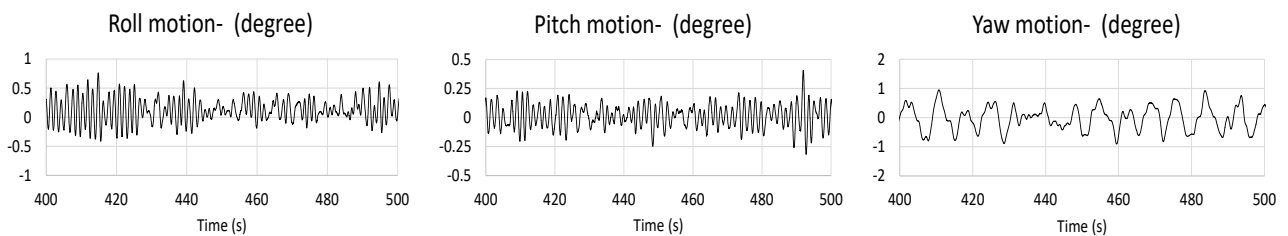


Figura 13. Séries temporais para os movimentos de rotação do modelo “Esso Osaka”. Ensaio 6.

Tabela 4. Amplitude de movimentos no centro de gravidade. Ensaio 6.

Variáveis	Avanço-X (cm)	Deriva-Y (cm)	Abatimento-Z (cm)	Rolo (°)	Cabeceio (°)	Guinada (°)
Min	-3.669	-2.752	-0.365	-0.644	-0.317	-0.938
Max	3.217	1.711	0.378	0.821	0.406	1.008
Total	6.885	4.463	0.743	1.465	0.723	1.947

### 3.3 Forças de amarração

A Figura 14 apresenta uma amostra das séries temporais das forças nas defensas e amarras no Ensaio 6, entre 400 s e 500 s. As forças de amarração são apresentadas em gramas (gf). A Tabela 5 apresenta as forças máximas de amarração para o ensaio 6, bem como a força inicial ou pré-tensão. Note-se que 200 gf de carga no modelo corresponde a, aproximadamente, 2000 kN de força no protótipo para uma escala de 1:80. Assim, as forças medidas para esta onda incidente ( $H_s = 6\text{m}$ ) são relativamente altas, o que era esperado para um espectro de ondas de alta energia.

### 4. COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo descreve a configuração do modelo físico e os ensaios realizados para medir as características da agitação marítima, para diferentes estados do mar, os movimentos de um navio amarrado no porto de Leixões e as forças atuantes no seu sistema de amarração. Os ensaios foram realizados num dos tanques de ondas do LNEC, onde a configuração do porto de Leixões com a extensão do quebra-mar norte foi implementada na escala 1:80. O navio é um modelo reduzido do navio-petroleiro “Esso Osaka” e está amarrado ao Posto A do Terminal de Petroleiros deste porto. Vários tipos de medições foram efetuados, nomeadamente, a elevação da superfície livre, velocidades, movimentos do navio e forças em defensas e amarras. Utilizou-se um sistema complexo desenvolvido em grande parte no LNEC e descrito no artigo.

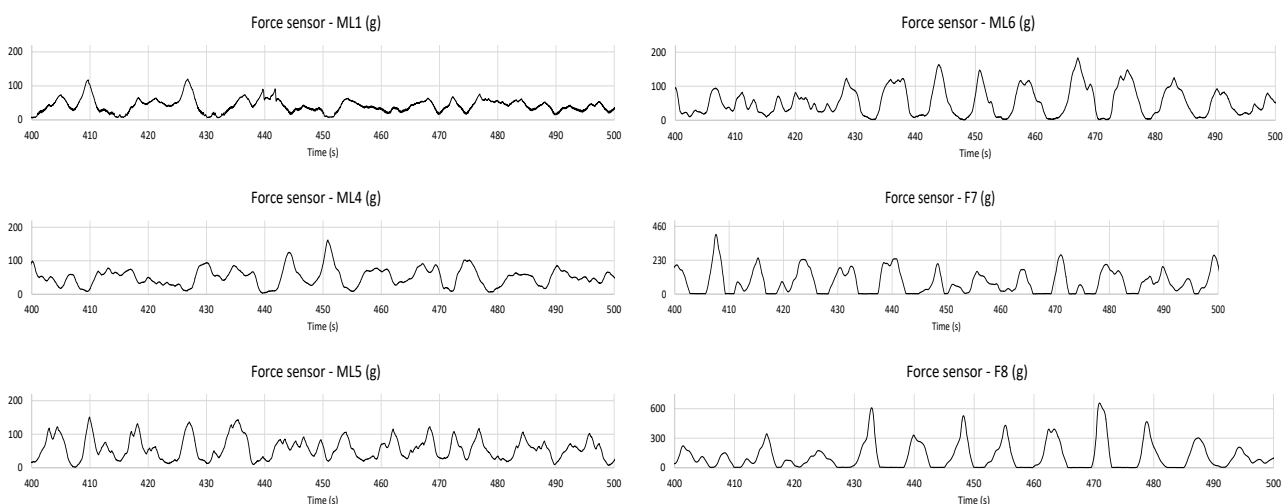
Estimou-se o espectro bidimensional na zona da cabeça do quebra-mar, bem como à proa e a

bombordo do navio. Nesses espectros foi possível identificar os estados de agitação marítima ondas incidentes e refletidos com base nas suas direções. Os resultados preliminares mostram que o equipamento utilizado foi capaz de medir com precisão e sem falhas todas as variáveis pretendidas. Em particular, o sistema de medição Optitrack™ foi considerado bastante eficaz para medir os movimentos do navio, quer lineares quer angulares. O sistema também garante alta frequência de aquisição e boa precisão.

Um sistema de molas lineares não é capaz de simular o que realmente acontece durante a amarração de navios sob a ação de ondas irregulares, principalmente durante as tempestades. O caráter não-linear da relação de forças-deflexões ou extensões das amarras e defensas obrigou ao desenvolvimento de um complexo sistema de molas para simular corretamente essas relações.

Os resultados mostram que o sistema desenvolvido no LNEC é capaz de simular o comportamento não linear das amarras e das defensas. A sincronização correta entre os diferentes modos de movimento e entre movimentos e forças mostra que os resultados são realistas. Uma análise aprofundada das repetições dos ensaios permitirá avaliar não apenas a repetibilidade, mas também a consistência e a precisão das medições.

O valor de pré-tensão nas amarras é um parâmetro fundamental que afeta os resultados das forças nas amarras e nas defensas. Os efeitos de um arranjo diferente das amarras e defensas deverá ser estudada de futuro, assim como o efeito de fatores de atrito diferentes para as defensas.



**Figura 14.** Séries temporais das forças de amarração nas amarras (ML1, ML4, ML5, ML6) e defensas (F7 e F8). Ensaio 6.

**Tabela 5.** Forças de amarração. Ensaio 6.

Tipo de amarração	ML1	ML4	ML5	ML6	F7	F8
Pré-tensão inicial (gf)	34.29	46.72	45.69	41.73	70.37	88.13
Carga máxima (gf)	122.99	162.05	215.07	183.39	491.14	745.3
Carga mínima (gf)	0	0	0	0	0	0

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto M & M SHIPS “Navios em Manobra e Amarrados em Portos” (PTDC / EMS-TRA / 5628/2014). Agradece-se ainda a colaboração no desenvolvimento e montagem dos equipamentos experimentais de Nuno Aires, Diogo Neves e Carlos Costa.

## REFERÊNCIAS

- Isobe M., Kondo K. e Horikawa K. (1984). Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. Proc. Symp. on Description and Modeling of Directional Seas, Paper No.A-6. 15pp.
- Johnson, D. (2002). DIWASP, a directional wave spectra toolbox for MATLAB®: User Manual. Research Report WP-1601-DJ, Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Marcos-Rita, M. (1984). On the behaviour of moored ships in harbors: Theory, practice and model tests. Thesis, LNEC, Lisbon.
- Neves, M.G., Fortes, C.J.E.M. e Lemos, R. (2017). Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões. Estudo I - Ensaios tridimensionais de agitação marítima. Relatório 315/2017 - DHA/NPE, LNEC, April.
- OptiTrack system. (2018) Retrieved July 30, 2018, from <http://www.optitrack.com>
- Pawka,S.S.(1983) Island shadows in wave directional spectra. J.Geophys.Res. 88(C4) 2579-2591
- Rosa-Santos, P., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., & Brògueira-Dias, E. (2010). Physical modelling of Leixões oil terminal – Portugal. Conference of Harbour Infrastructure Seminar (PIS), Delft, Netherlands.
- Santos, J.A. (2005). Porto de Leixões – Modelação numérica do comportamento de navio amarrado ao posto A. Relatório 405/05 – DHA/NPE, LNEC, Dezembro.
- Thewlis, D., Bishop, C., Daniell, N. & Paul, G. (2013). Next-Generation low-cost motion capture systems can provide comparable spatial accuracy to high-end systems. Journal of Applied Biomechanics, 29 (1), pp.112-117.