

# MODELAÇÃO FÍSICA DO COMPORTAMENTO DE NAVIOS AMARRADOS EM PORTOS: APLICAÇÃO AO TERMINAL DE PETROLEIROS DE LEIXÕES

*Paulo Rosa Santos*

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal.

*pjrs@fe.up.pt*

## RESUMO

As interacções entre o navio, o sistema de amarração e a própria bacia portuária são complexas, sendo a resposta do navio às solicitações exteriores a que é submetido normalmente não-linear. Neste contexto, a modelação física tem um papel de relevo. No entanto, para que os resultados obtidos possam ser utilizados com confiança, é fundamental que os principais fenómenos físicos que governam a resposta dos navios amarrados (no interior de portos) estejam correctamente reproduzidos no modelo físico.

O presente trabalho apresenta as principais técnicas utilizadas no estudo do comportamento de navios amarrados em portos; realça a importância do uso de agitação irregular nesses estudos; e analisa a influência da duração do teste experimental (tempestade) e da sequência temporal das ondas geradas, na resposta de um navio amarrado. Por último, são apresentadas algumas das principais conclusões obtidas no âmbito do estudo do comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões, nomeadamente ao nível da compreensão da influência de alguns fenómenos nas condições operacionais existentes e da análise da eficácia de algumas intervenções passíveis de serem implementadas nesse posto de acostagem.

## 1 INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram marcadas por um significativo aumento do volume de mercadorias transportado por via marítima. Mais recentemente, numa conjuntura muito influenciada pela crise económica e financeira internacional, verificou-se um abrandamento do ritmo de crescimento que se estava a observar. No contexto actual, a competitividade e a eficiência dos portos e dos seus terminais tornaram-se factores ainda mais determinantes, e não podem ser dissociadas de questões relacionadas com a segurança e a minimização dos riscos e dos impactos ambientais associados às actividades portuárias.

Neste sector de actividade é essencial que os terminais portuários estejam operacionais durante praticamente todos os dias do ano, mas também que o tempo de permanência do navio no porto seja reduzido ao mínimo. Estes requisitos estão relacionados com o comportamento dos navios depois de amarrados no cais, nomeadamente com a amplitude dos seus movimentos e com as forças aplicadas nos elementos do sistema de amarração.

Assim, a minimização da inoperacionalidade dos terminais portuários e do tempo de permanência do navio no porto assumem, nos dias de hoje, um papel de destaque. Por outro lado, é também importante minimizar os custos operacionais e os riscos ambientais e de segurança associados à manobra do navio e ao seu comportamento depois de amarrado. Este tema é estratégico para Portugal, devido à sua posição geográfica no contexto da Europa, justificando-se a realização de investigação nesta área, com o intuito de melhor compreender a dinâmica do sistema constituído pelo navio, o seu sistema de amarração, a estrutura de acostagem e a bacia portuária.

Apesar de os modelos numéricos terem ganho muita importância, nos últimos anos, no domínio da engenharia costeira e portuária, ainda não podem substituir, completamente, os estudos em modelo físico. Assim, e na situação particular em análise, a modelação física continua a ser uma das ferramentas mais fiáveis para o estudo do comportamento de navios amarrados em portos

(Moes e Hough, 1999; Davies *et al.*, 2001; van der Molen e Moes, 2009), encontrando aplicação, não só no projecto de instalações portuárias e no estudo de problemas de operacionalidade, mas também como instrumento de calibração dos modelos numéricos, ou como meio de abordagem de problemas muito complexos, para os quais os modelos numéricos ainda não conseguem dar uma resposta satisfatória. Importa acrescentar que a modelação física e a modelação numérica devem ser vistas como ferramentas complementares, sendo que a sua utilização conjunta pode permitir superar as limitações associadas a cada uma delas.

Os modelos físicos, mesmo tratando-se de reproduções simplificadas da realidade (protótipo), permitem a reprodução dos fenómenos que mais influenciam a resposta de um navio amarrado num porto, quando submetido à acção da agitação marítima e dos efeitos não-lineares que lhe estão associados. No entanto, para que os resultados de um modelo físico possam ser usados com confiança, em projecto ou investigação, é necessário assegurar que todas as variáveis com interesse estão correctamente reproduzidas no modelo, e que este é realista e preciso.

Neste contexto, o grau de aproximação com que as condições de agitação são reproduzidas no modelo é fundamental. Assim, um dos objectivos deste trabalho consiste em analisar, para um número determinado de condições, a influência da duração do teste experimental e da sequência temporal de ondas geradas, no conteúdo energético de baixa-frequência dos estados de agitação marítima reproduzidos e na resposta do navio amarrado, de forma a apresentar contributos para a definição da duração mínima deste tipo de testes.

O trabalho desenvolvido foi baseado em resultados experimentais obtidos no âmbito de uma dissertação de doutoramento em Engenharia Civil e do projecto de I&D DOLPHIN (FCT), que visaram o estudo do comportamento de navios amarrados. O caso de estudo foi o Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões.

O Porto de Leixões, situado no Norte de Portugal, possui um terminal de petroleiros constituído por três postos de acostagem, Figura 1. O Posto “A”, localizado na entrada do porto, é o mais exposto às acções do ambiente marítimo-portuário, apresentando, por vezes, alguns problemas operacionais. Por esse motivo foi o posto de acostagem escolhido para caso de estudo.

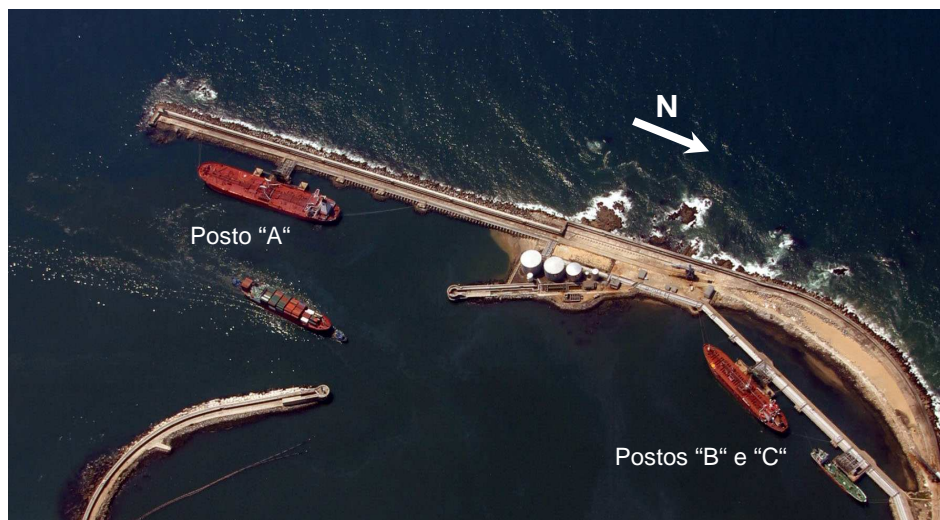


Figura 1 – Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões.

Este trabalho é relativo à componente experimental do estudo referido, que incluiu a realização de testes com dois modelos da área portuária adjacente ao Terminal de Petroleiros de Leixões, construídos à escala geométrica 1/100. Importa referir que decorreram cerca de 26 anos desde a conclusão do último trabalho realizado em Portugal nesta área (Rita, 1984), que foi também o primeiro. Por esse motivo, as técnicas utilizadas no estudo em modelo físico do comportamento de navios amarrados em portos são também descritas sumariamente.

Por fim, são apresentadas algumas das principais conclusões obtidas no âmbito do estudo do comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões.

## 2 COMPONENTES DO MODELO FÍSICO E PLANIFICAÇÃO DO ESTUDO

A operacionalidade e as condições de segurança de um porto, ou terminal portuário, começaram por ser inferidas com base nas condições de agitação junto aos postos de acostagem, obtidas a partir de estudos em modelo físico, realizados sem navios e com ondas regulares. Apenas mais tarde se reconheceu a importância de realizar esses testes com agitação irregular, mais próxima da realidade (secção 3). A dificuldade em caracterizar o comportamento do navio amarrado com base, apenas, numa altura de onda, contribuiu, de forma decisiva, para a introdução do modelo do navio nos estudos em modelo físico, Rita, 1984.

A melhor forma de assegurar a qualidade dos resultados obtidos num estudo em modelo físico é através da calibração global do modelo usando dados do protótipo, o que raramente é possível na prática, pelo que se opta, habitualmente, pela calibração individual de cada uma das suas componentes, Davies *et al.*, 2001. As secções seguintes referem-se às principais componentes dos modelos construídos tendo em vista o estudo do comportamento de navios amarrados, bem como aos procedimentos utilizados na sua calibração.

### 2.1 Navio

Uma das primeiras fases do trabalho consiste na selecção de um navio (ou conjunto de navios) representativo do tipo de navios que regularmente utiliza (ou irá utilizar) o terminal portuário em estudo, e na construção do seu casco à escala geométrica definida para o estudo. Os materiais mais utilizados na construção destes modelos são: a madeira, a espuma de alta densidade, o plástico reforçado com fibra de vidro e outros materiais compósitos.

Posteriormente, cada um dos modelos construídos é calibrado para uma determinada condição de carga, de modo a reproduzir o comportamento dinâmico e hidrodinâmico do correspondente navio real (protótipo). Nesta fase, através de procedimentos iterativos, é realizado o ajuste da distribuição de massas do modelo, de forma a posicionar correctamente o centro de gravidade do navio e obter os períodos naturais de oscilação pretendidos segundo os modos de oscilação verticais, Figura 2. Rita, 1984, e Rosa Santos, 2010, descrevem as várias etapas da calibração dos modelos de navios.

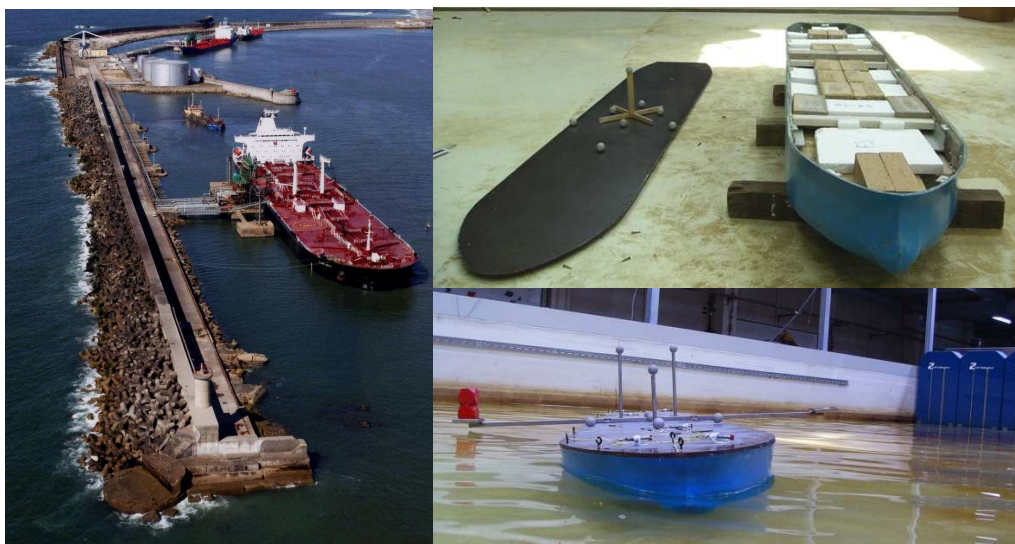


Figura 2 – Navio seleccionado amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões (esquerda). Distribuição dos pesos de lastro no interior do modelo do navio (direita, superior). Calibração do modelo do navio: experiência de inclinação transversal (direita, inferior).

O Quadro 1 apresenta as principais características do navio tanque seleccionado para o estudo das condições operacionais do Terminal de Petroleiros de Leixões, no protótipo e no modelo construído à escala geométrica 1/100. Este navio apresenta 105000 dwt e pretende representar a classe dos navios de maior porte que utilizavam o Posto “A” desse terminal, e estava, à data de realização do estudo, fretado em exclusividade pela Galp Energia.

Quadro 1 – Características do navio seleccionado para a condição de carga máxima.

Característica	Protótipo	Modelo (1/100)
Deslocamento	122 714 t	119.721 kg
Comprimento total	245.05 m	2.451 m
Comprimento entre perpendiculares	236.00 m	2.360 m
Boca	43.00 m	0.430 m
Calado	14.10 m	0.141 m
Posição vertical do centro de gravidade	12.46 m	0.125 m
Altura metacêntrica transversal	5.83 m	0.058 m
Posição long. do centro de impulsão	128.41 m	1.284 m
Período natural da oscilação de balanço	12.5 s	1.25 s

## 2.2 Sistema de acostagem e amarração

As características dos dispositivos de acostagem e de amarração são muito importantes para a satisfação das exigências operacionais de um terminal portuário, pois influenciam a frequência com que este se encontra operacional, a eficiência com que as operações de movimentação de carga são realizadas e as condições de segurança. A influência destes dispositivos na resposta do navio faz-se sentir, sobretudo, ao nível dos seus movimentos horizontais (i.e. avanço, deriva e guinada).

As defensas e os cabos de amarração, sendo usualmente os componentes de menor rigidez do sistema de amarração, são os que mais condicionam o comportamento do navio (por exemplo, os períodos naturais de oscilação do navio amarrado dependem da sua elasticidade), devendo, por isso, ser reproduzidos convenientemente no modelo físico.

As características elásticas dos cabos de amarração e das defensas podem ser reproduzidas, no modelo físico, através de uma associação de molas helicoidais de comportamento linear. A utilização de transdutores de força possibilita a medição das forças aplicadas nesses elementos durante os testes, Figura 3. Como se considera que a elasticidade dos cabos de amarração reais é reproduzida, exclusivamente, pelo conjunto “associação de molas – transdutor de força”, o fio usado na amarração do modelo do navio no cais terá de apresentar uma rigidez elevada, sendo corrente a utilização de fio de kevlar.

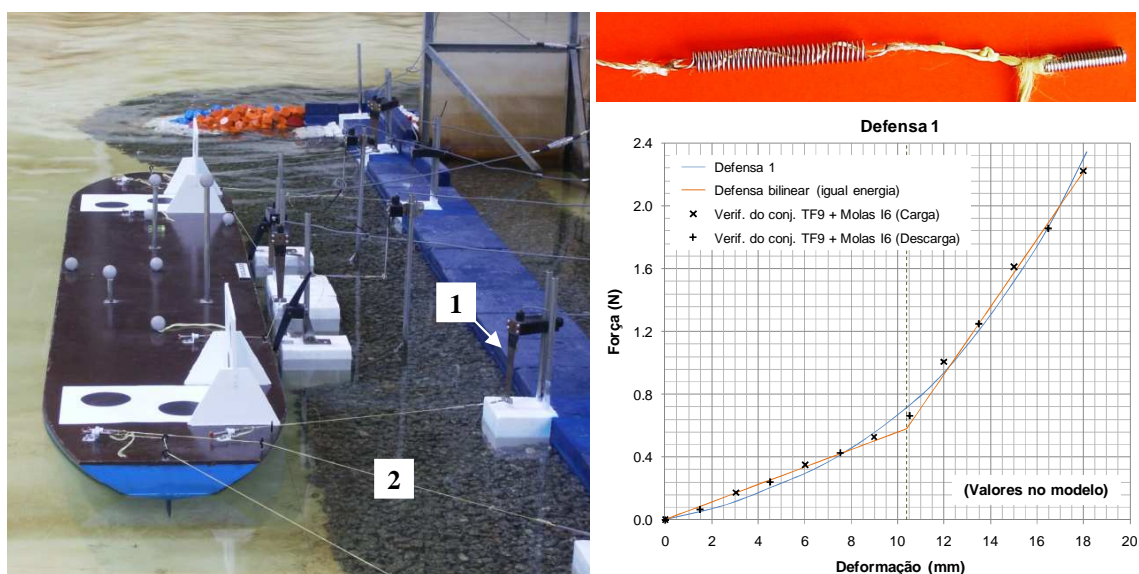


Figura 3 – Modelo do navio amarrado no Posto “A”: (1) transdutor de força e (2) fio de amarração em kevlar (esquerda). Mola helicoidal com alongamento condicionado (direita, superior). Reprodução da curva de “força-alongamento” de uma defesa não-linear recorrendo a uma aproximação bilinear (direita, inferior).

As curvas “força-deformação” (relações constitutivas) dos cabos de amarração e das defensas têm, habitualmente, um comportamento não-linear que, por simplificação, pode ser linearizado impondo como condição que a energia dispendida na deformação desse elemento até à rotura seja igual à dispendida na deformação de um elemento com um comportamento linear, até à mesma deformação-limite. Ou seja, a rigidez do elemento, que é função da sua deformação, é “substituída” pela rigidez constante (linear) de um cabo de amarração (ou defesa) equivalente, com a mesma capacidade de absorção de energia do cabo (ou defesa) não-linear até à sua deformação-limite. A elasticidade dos elementos do sistema de amarração do navio deverá ser verificada, por calibração, antes da realização de cada série de testes em modelo físico.

A não-linearidade associada às relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração é susceptível de condicionar o comportamento do navio no cais, justificando-se, nestes casos, a adopção de outras técnicas. É possível reproduzir no modelo uma relação “força-deformação” não-linear, de um modo mais aproximado e sem a utilização de dispositivos muito sofisticados, através de uma associação, em série, de molas com características elásticas distintas, em que pelo menos uma apresenta um alongamento máximo condicionado, Figura 3 – direita. Com esta técnica, a curva força-deformação é aproximada a dois ou mais segmentos de recta, consoante o número de molas utilizadas com o alongamento condicionado.

As características elásticas dos cabos de amarração (no protótipo) são definidas considerando o seu comprimento total, que é medido desde o ponto de amarração na estrutura de acostagem até ao guincho localizado no convés do navio. Os cabos de amarração pertencentes ao mesmo grupo (com a mesma orientação, comprimento e características) são normalmente reproduzidos no modelo através de um único cabo, com características elásticas equivalentes às do conjunto.

Os navios são usualmente amarrados no terminal em estudo com dezasseis cabos (dois cabos em cada direcção). No modelo físico foram utilizados apenas oito cabos equivalentes. A Figura 4 apresenta os *layouts* de amarração estudados: o *layout* mais frequentemente usado pelos navios de maior porte no Posto “A”, ligeiramente assimétrico (cabos a azul); e um *layout* alternativo que tira partido do gancho de amarração localizado junto à extremidade do quebramar Norte para a amarração dos lançantes de proa designados por “CA8”. Este último *layout* é aproximadamente simétrico e está mais de acordo com as recomendações apresentadas em OCIMF, 2008, para a amarração de navios.

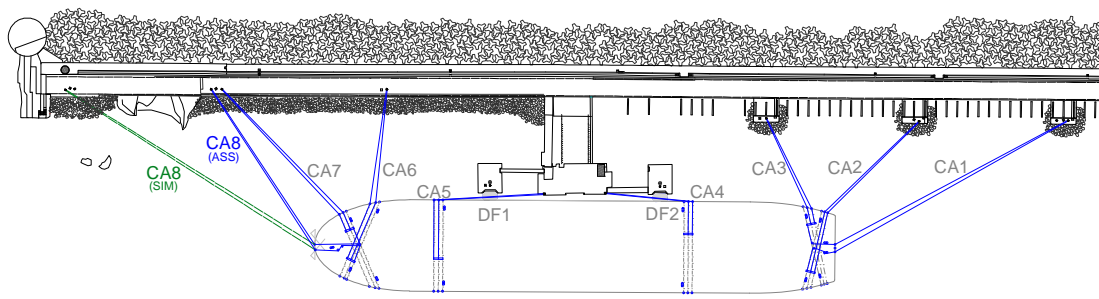


Figura 4 – *Layouts* de amarração do navio. Identificação dos cabos de amarração e das defensas.

As características dos cabos de amarração utilizados pelos navios no Posto “A” podem variar, mas é frequente a utilização de cabos de aço com extremidades de amarração de fibras sintéticas (e.g. poliamida). As defensas instaladas no Posto “A” são do tipo flutuante (pneumáticas) e têm uma capacidade máxima de absorção de energia de 1300 kJ, à qual está associada uma força de reacção no duque d’Alba de 2450 kN.

O comportamento de um navio amarrado no Posto “A” foi também estudado para dois tipos de cabos de amarração, sendo que na condição (2) os cabos eram mais rígidos do que os usados na condição (1). O Quadro 2 apresenta as características de todos os elementos do sistema de amarração para as condições consideradas (valores do protótipo). O comportamento não-linear das curvas força-deformação foi linearizado aplicando a técnica referida anteriormente, excepto na situação (2), e apenas no caso das defensas, em que foi utilizada uma aproximação bilinear a essas curvas (Figura 3 – direita).

Quadro 2 – Características dos cabos de amarração (CA) e das Defensas (DF).

Cabo de Amarração & Defesa ID	Comprimento do cabo de amarração (m)	Rigidez (kN/m)		
		(1)	(2)	
Lançante de popa	<b>CA1</b> (ASS & SIM)	150	173.53	457.82
Lançante de popa	<b>CA2</b> (ASS & SIM)	90	349.83	598.11
Través de popa	<b>CA3</b> (ASS & SIM)	55	510.76	696.59
Regeira de popa	<b>CA4</b> (ASS & SIM)	55	504.84	697.31
Regeira de proa	<b>CA5</b> (ASS & SIM)	82	352.69	611.21
Través de proa	<b>CA6</b> (ASS & SIM)	82	351.99	610.40
Lançante de proa	<b>CA7</b> (ASS & SIM)	90	349.42	583.53
Lançante de proa	<b>CA8</b> (ASS)	120	317.49	518.55
Lançante de proa	<b>CA8</b> (SIM)	167	168.61	430.28
Defensa de proa <sup>(a)</sup>	<b>DF1</b> (ASS & SIM)	--	886.63	587.53 2146.66
Defensa de popa <sup>(a)</sup>	<b>DF2</b> (ASS & SIM)	--	877.40	576.26 2114.58

ASS – *layout* de amarração assimétrico;  
SIM – *layout* de amarração simétrico;  
Nota: <sup>(a)</sup> na condição (2), o comportamento não-linear das defensas foi reproduzido, no modelo, por uma curva força-deformação bilinear, sendo indicada a rigidez do primeiro e do segundo trecho. A deformação associada à mudança de rigidez é de 1.02 m (nos dois casos).

De modo a garantir que os testes de uma dada série são efectuados nas mesmas condições e, portanto, que os resultados obtidos são passíveis de ser comparados, é conveniente instalar no modelo do navio, nas posições correspondentes à localização dos guinchos, mecanismos que permitam o ajuste das forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração (antes do início dos testes), Figura 5. Nos testes realizados foram consideradas duas condições de pré-tensão: na “condição base” as forças aplicadas nos cabos de amarração em situação de repouso eram da ordem dos 100 a 120 kN; na “condição pré-tensão extra” as forças aplicadas nos traveses foram aumentadas para cerca de 245 a 265 kN, enquanto nos restantes cabos foram mantidas no intervalo definido para a “condição base”. Os valores apresentados referem-se ao protótipo e a cada um dos cabos que são lançados em cada direcção para amarrar o navio no cais.



Figura 5 – Pormenor do mecanismo de ajuste das forças iniciais aplicadas nos cabos de amarração (esquerda); posicionamento dos quatro mecanismos instalados à proa do modelo do navio (direita).

A reprodução das defensas no modelo pode apresentar dificuldades adicionais, nomeadamente no que concerne à reprodução das relações constitutivas destes elementos (muito não-lineares), da dissipação de energia na defesa por *histerese* e do coeficiente de atrito na interface “navio-defensas”, mas também à medição das forças normais e tangenciais aplicadas na defesa. A utilização de dispositivos de simulação simplificados é, por vezes, justificada pelo facto de, para

as condições de agitação mais energéticas, o modelo do navio tender a “ressaltar” das defensas com frequência (perde o contacto com as defensas). No entanto, há situações em que pode ser necessário estudar o comportamento do navio amarrado para condições ambientais intermédias e, portanto, utilizar dispositivos relativamente sofisticados.

A Figura 6 apresenta o dispositivo utilizado na simulação das defensas no modelo, constituído por um transdutor de força e um mecanismo articulado posicionado na parte frontal do duque d’Alba. As características elásticas da defesa são reproduzidas por uma combinação de molas helicoidais, o que torna possível a reprodução de relações “força-deformação” não-lineares. O contacto com o navio é materializado por um elemento esférico, cuja posição relativamente ao plano de água pode ser ajustada, de forma a permitir a simulação de diferentes níveis de maré (no caso de defensas flutuantes).

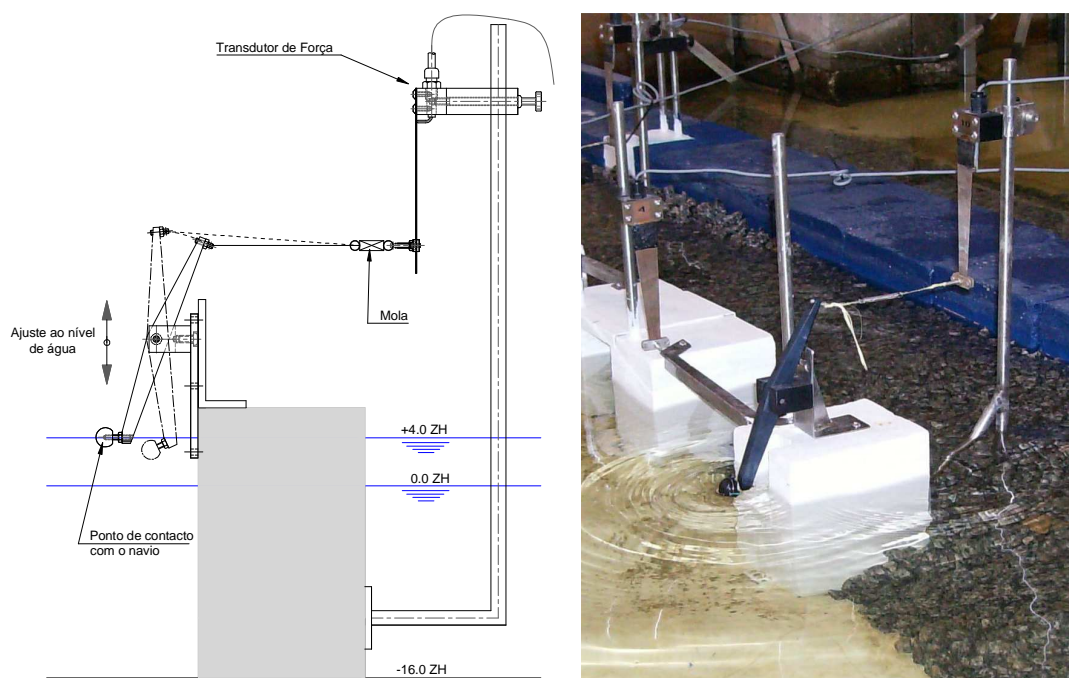


Figura 6 – Representação esquemática (esquerda) e fotografia (direita) do dispositivo de simulação das defensas.

A substituição do elemento esférico, ou do seu revestimento, permite a reprodução, no modelo, de diferentes coeficientes de atrito,  $\mu$ , da interface “navio-defensa”. Na avaliação da influência desse coeficiente no comportamento do navio amarrado foram consideradas duas superfícies de interface, Quadro 3. O modelo do petroleiro foi fabricado em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).

Quadro 3 – Ângulos e coeficientes de atrito (estático) para as superfícies consideradas.

Interface “navio-defensa”	Designação	Ângulo (°)	$\mu$
PRFV – Polietileno	Baixo atrito	6.1 – 7.3	0.11 – 0.13
PRFV – Borracha	Atrito elevado	24.4 – 25.7	0.45 – 0.48

### 2.3 Área portuária

O estudo do comportamento de um navio amarrado no interior de um porto requer, naturalmente, a reprodução no modelo físico das obras de abrigo portuário, das estruturas de acostagem, da batimetria no interior do porto e na sua envolvente, entre outros. A definição da área portuária a reproduzir no modelo físico e da escala geométrica a que o estudo é realizado deve ter em conta a finalidade do trabalho, as características da instalação experimental e condicionantes de ordem

técnica, logística e económica. Este tema não é aprofundado neste trabalho, sugerindo-se, como referência, Hughes, 1993, ou Rosa Santos, 2010, caso se pretenda uma abordagem centrada no caso de estudo do Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões.

#### 2.4 Estudo em modelo físico

O trabalho desenvolvido nas secções seguintes baseia-se em resultados experimentais obtidos no âmbito de uma tese de doutoramento e do projecto de I&D DOLPHIN, que visaram o estudo do comportamento de navios amarrados em portos.

O estudo experimental foi subdividido em duas fases, e realizado no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que possui um tanque de ondas com 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1.2 m de profundidade. Este tanque está equipado com um sistema de geração de ondas do tipo multi-elementos (*HR Wallingford, UK*), que tem associado um sistema dinâmico de absorção de reflexões. Os modelos físicos foram construídos de acordo com os critérios de semelhança de *Froude* e de *Cauchy*, para uma escala geométrica não distorcida igual a 1/100.

Na primeira do estudo fase foi construído e testado um modelo físico simplificado do Posto "A" e da sua área envolvente que incluiu a reprodução da estrutura de acostagem, das características elásticas dos cabos de amarração e das defensas e, naturalmente, das características estáticas e dinâmicas do navio seleccionado. A profundidade de água foi considerada uniforme (fundos à cota -16 m ZHL). Na impossibilidade de reproduzir, neste modelo, o fenómeno da difracção em torno da cabeça do quebramar Norte de Leixões, assim como as reflexões no talude exterior do molhe Sul e na Praia de Matosinhos, foram definidas condições de agitação marítima realistas, que tiveram em consideração a localização do Posto "A" e resultados de simulações numéricas da propagação de estados de agitação marítima para o interior do porto.

Os objectivos definidos para a primeira fase do estudo consistiram na clarificação da influência de alguns fenómenos nas condições operacionais e de segurança do Posto "A", na análise de algumas intervenções propostas em estudos anteriores, e na apresentação de novas soluções de intervenção com base nos resultados experimentais obtidos.

Os estados de agitação irregular foram definidos com base num espectro de JONSWAP (factor de forma igual a 3.3). Como se tratou de um estudo efectuado em águas pouco profundas, foi introduzida uma compensação de segunda ordem no sinal de controlo do movimento das pás do sistema de geração de ondas, que procura assegurar, em tempo real, que as ondas de longo período ligadas (*set-down*) se propagam no modelo físico de uma forma realista, e sem serem "contaminadas" por efeitos indesejados de segunda ordem. A Figura 7 apresenta a implantação do modelo físico no tanque de ondas na primeira fase do estudo.

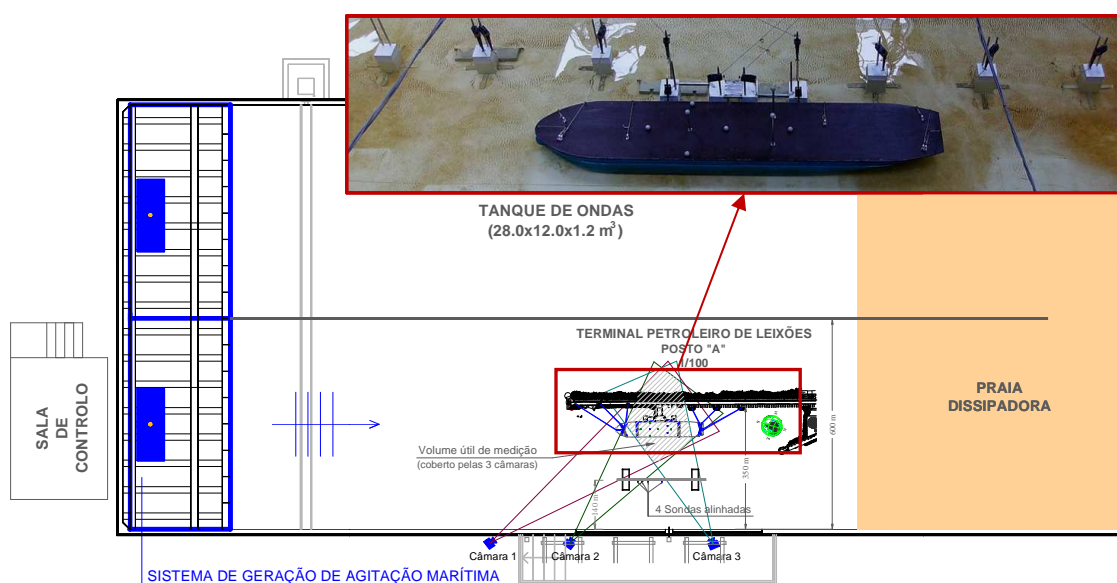


Figura 7 – Implantação do modelo físico no tanque de ondas na primeira fase do estudo.

Na segunda fase do estudo foi construído um modelo físico que reproduzia com maior rigor as características do protótipo. Para além das componentes já consideradas na primeira fase, esse modelo incluiu ainda a reprodução do quebramar Norte de Leixões, do antigo quebramar Norte, da “Prainha” situada entre essas estruturas, do molhe Sul e de parte da Praia de Matosinhos, Figura 8. A profundidade de água foi considerada uniforme (fundos à cota -16 m ZHL), excepto na zona das praias. No modelo, as condições de agitação na zona do Posto “A” eram o resultado da difracção das ondas incidentes em torno da cabeça do quebramar Norte e da reflexão dessas ondas no molhe Sul e na Praia de Matosinhos.



Figura 8 – Porto de Leixões e área envolvente, com delimitação da região reproduzida no modelo físico da segunda fase do estudo [fonte: *Google Earth*].

Os estados de agitação reproduzidos apresentavam uma direcção de propagação perpendicular ao quebramar Norte, ou seja, eram provenientes de um rumo próximo do Oeste ( $W-20^{\circ}-S$ ). De facto, estudos anteriores mostraram que um grande número de situações de inoperacionalidade do Posto “A” estava associado a este rumo, IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005, que foi também apontado pelos pilotos da barra de Leixões, e pelos responsáveis pela exploração do terminal de petroleiros, como o mais problemático. O rumo  $W-20^{\circ}-S$  permite ainda minimizar os problemas associados à reflexão da agitação nas paredes laterais do tanque de ondas, Figura 9.

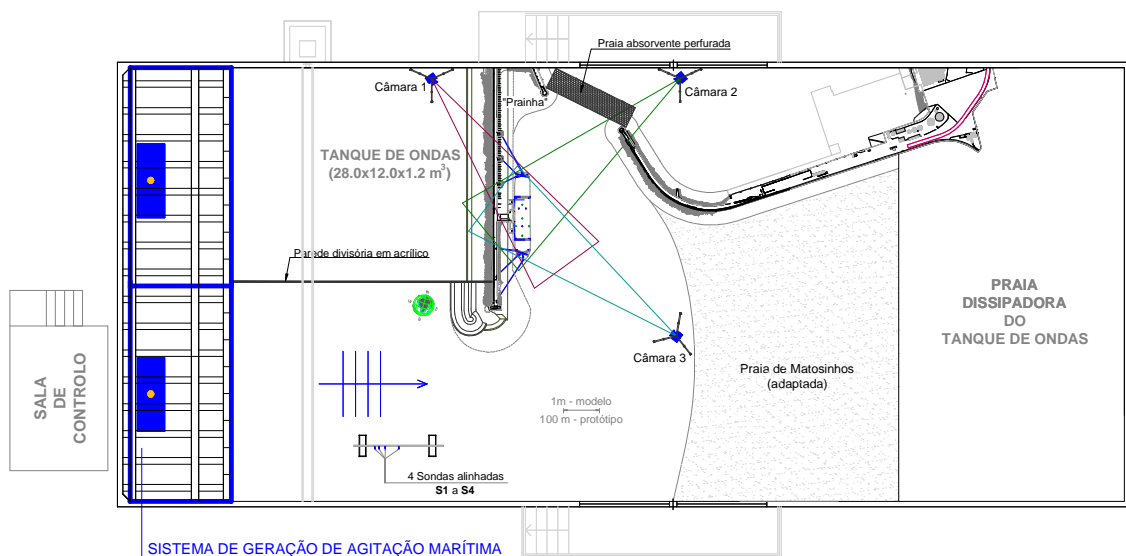


Figura 9 – Implantação do modelo físico no tanque de ondas na segunda fase do estudo.

Uma vez que o fenómeno da transmissão, através do quebramar Norte e por galgamento, seria afectado, no modelo, por efeitos de escala significativos, em resultado da não utilização de uma semelhança completa e da escala seleccionada, optou-se por apenas reproduzir rigorosamente a cabeça do quebramar Norte, pois tem influência na difracção das ondas incidentes. A restante extensão desta estrutura foi simplificada.

As características reflectoras do talude interior do quebramar Norte, do talude exterior do molhe Sul, da Praia de Matosinhos e da Prainha foram também reproduzidas, pois têm influência nas condições de agitação na zona do Posto "A". A topo-hidrografia e o comprimento da Praia de Matosinhos foram ligeiramente adaptados para minimizar a ocorrência de reflexões indesejadas nas paredes laterais do tanque de ondas e porque o espaço disponível para a instalação dessa praia era limitado, Figura 10. As várias medidas tomadas para minimizar os efeitos laboratoriais no interior da instalação experimental são apresentadas em Rosa Santos, 2010.

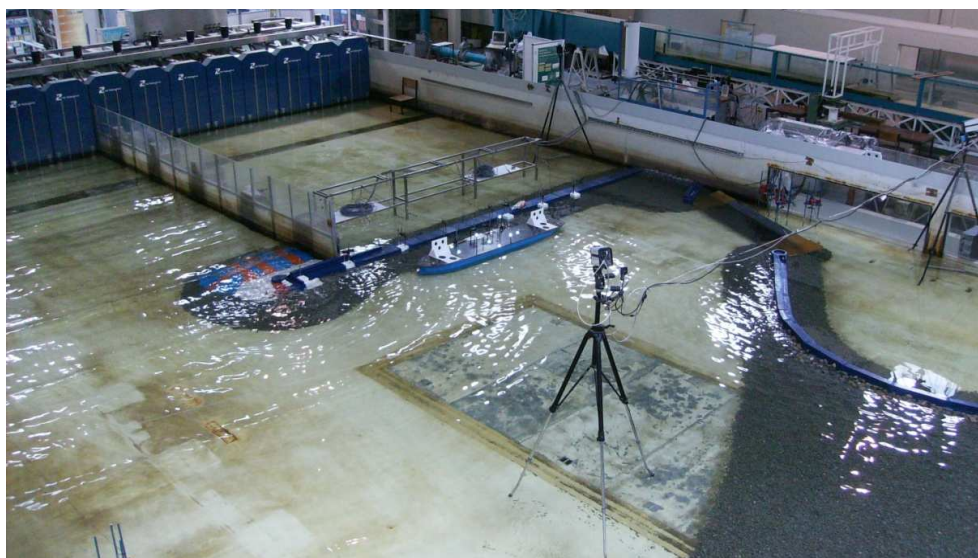


Figura 10 – Modelo físico testado na segunda fase do estudo.

Durante os testes, as forças aplicadas nos elementos do sistema de amarração do navio foram medidas com dez transdutores de força (oito associados aos cabos de amarração e dois às defensas). Os movimentos do navio, segundo os seus seis graus de liberdade, foram medidos com o sistema *Qualisys*, constituído por três câmaras digitais de infra-vermelhos. A elevação da superfície livre da água foi registada por várias sondas de níveis hidrodinâmicos do tipo resistivo. A determinação da altura de onda significativa incidente no modelo foi feita com base na análise dos registos das sondas S1 a S4, Figura 9. A frequência de aquisição de todos os instrumentos foi fixada em 24 Hz (i.e. 2.4 Hz no protótipo). Neste tipo de estudos é prática corrente considerar válidos apenas os registos adquiridos a partir do momento em que se estabelece uma situação de "equilíbrio dinâmico" entre a movimentação do navio e a agitação gerada.

### 3 REPRODUÇÃO DAS CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

A reprodução das condições de agitação marítima no modelo físico é um aspecto de particular importância no estudo do comportamento de navios amarrados. Pese embora o facto de muitos estudos, realizados no domínio da engenharia costeira e portuária, utilizarem apenas ondas regulares (caracterizadas por uma altura e por um período de onda), a consideração do carácter irregular e aleatório da agitação marítima é fundamental quando se pretende determinar a resposta não-linear de sistemas dinâmicos, como é o caso de um navio amarrado no interior de um porto.

De facto, o comportamento de um navio amarrado no plano horizontal é usualmente controlado pelos períodos naturais introduzidos pelo seu sistema de amarração. Como a massa do navio é relativamente elevada, quando comparada com a rigidez do seu sistema de amarração, esses períodos naturais tendem a ser significativamente maiores do que os períodos característicos da agitação marítima. Assim, as componentes não-lineares da agitação marítima, relacionadas

com efeitos de segunda ordem, assumem um papel de relevo na medida em que podem excitar esses modos de oscilação de baixa-frequência.

Esta secção visa realçar a importância da reprodução do carácter irregular e aleatório da agitação marítima quando se pretende estudar o comportamento de navios amarrados em portos, assim como analisar a influência da duração do teste e da sequência temporal de ondas geradas, no conteúdo energético de baixa-frequência dos estados de agitação marítima reproduzidos e nos parâmetros caracterizadores da resposta do navio amarrado.

### 3.1 Reprodução do carácter irregular da agitação marítima

A avaliação da importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima é feita com base em resultados de testes efectuados na primeira fase do estudo utilizando ondas regulares e irregulares. O modelo do navio foi calibrado para a condição de carga máxima e amarrado no cais com o *layout* assimétrico, Figura 4. As características elásticas do sistema de amarração são as indicadas no Quadro 2 para a condição (1). Considerou-se ainda um coeficiente de atrito na interface “navio-defensas” de cerca de 0.12, e uma profundidade de água junto ao cais igual a 18 m, correspondente ao nível médio da água do mar. As forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração foram fixadas entre 100 e 120 kN. Para caracterizar convenientemente os estados de agitação irregulares, os testes foram realizados com 600 ondas (aproximadamente).

A Figura 11 compara as amplitudes dos movimentos do navio (valores pico-a-pico) que resultam dos testes efectuados com ondas regulares e irregulares, com uma altura de onda de 1.5 m (no caso de agitação irregular – altura de onda significativa) e os seguintes períodos de onda: 16 e 20 s (no caso de agitação irregular – período de onda de pico). Para cada modo de oscilação do navio são apresentadas as amplitudes máximas (Máx), significativas (Sign) e médias (Méd).

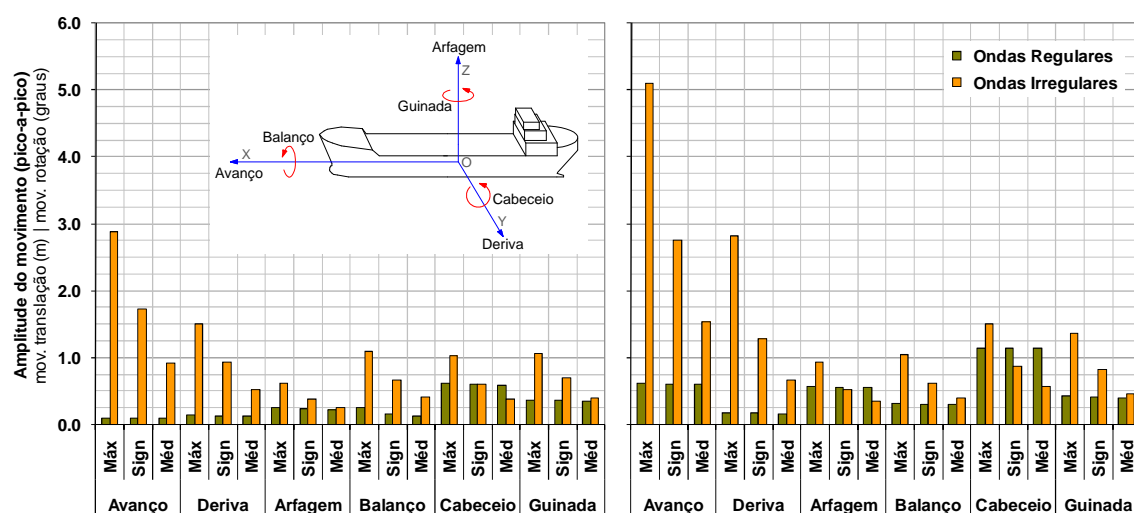


Figura 11 – Amplitudes dos movimentos do navio. Testes realizados com ondas regulares e irregulares, com uma altura de onda de 1.5 m e os seguintes períodos de onda: 16 s (esquerda) e 20 s (direita).

A utilização de ondas regulares no estudo conduziu a uma significativa subavaliação da amplitude dos movimentos horizontais do navio (avanço, deriva e guinada), Figura 11. No que concerne ao comportamento do navio no plano vertical, os resultados apresentados para as duas situações analisadas são mais próximos, especialmente no caso da arfagem e do cabeceio. Importa frisar que os movimentos horizontais são os que mais influenciam a operacionalidade e as condições de segurança de um terminal para navios do tipo petroleiro, Bruun, 1983.

A análise espectral das séries temporais dos movimentos do navio permite compreender melhor os resultados apresentados. A Figura 12 apresenta, como exemplo, os espectros de variância estimados para os modos de oscilação de avanço, balanço e guinada, que foram sobrepostos, no mesmo gráfico, aos espectros da agitação incidente no modelo físico (em testes com ondas regulares e irregulares). Rosa Santos, 2010, apresenta uma análise mais detalhada, que inclui outros modos de oscilação e condições de teste.

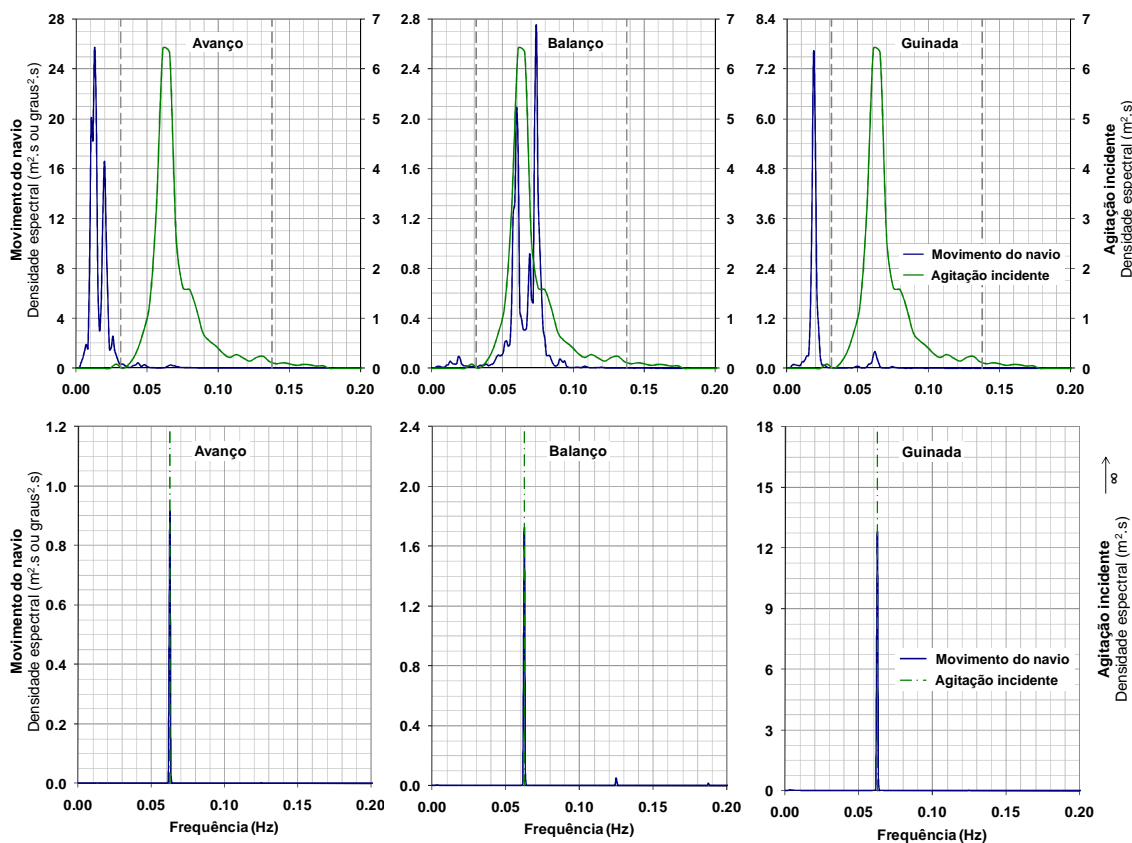


Figura 12 – Análise espectral das séries temporais dos movimentos do navio amarrado e da agitação incidente no modelo físico (valores do protótipo). Testes realizados com ondas irregulares (superior) e regulares (inferior), com um período de onda de 16 s e uma altura de onda de 1.5 m.

Nos resultados dos testes efectuados com ondas irregulares pode observar-se a existência de um desfasamento entre os espectros da agitação incidente e os espectros dos movimentos do navio no plano horizontal (avanço e guinada). De facto, a Figura 12 mostra que os períodos de pico associados aos espectros desses movimentos são superiores aos da agitação incidente, mas da mesma ordem de grandeza dos períodos naturais de oscilação do navio apresentados no Quadro 4. Os espectros relativos aos movimentos verticais, pelo contrário, não se encontram desfasados em relação aos da agitação incidente, pelo que as frequências de pico associadas a esses espectros situam-se na gama de frequências da agitação, sendo também próximas das frequências naturais de oscilação do navio. Nos testes com ondas regulares, a resposta do navio, nos planos horizontal e vertical, ocorre, exclusivamente, na frequência da agitação incidente.

Quadro 4 – Períodos e frequências naturais de oscilação do navio para as condições de teste em análise (valores de protótipo).

Movimentos do navio		$T_{nat}$ (s)	$f_{nat}$ (Hz)
Horizontais	Avanço	67.0	0.0149
	Deriva	76.1	0.0131
	Guinada	54.2	0.0185
Verticais	Arfagem	16.6	0.0602
	Balanço	14.0	0.0714
	Cabeceio	13.9	0.0719

Os períodos naturais apresentados foram determinados a partir dos resultados de experiências de “decaimento livre”, realizadas com o navio amarrado no posto de acostagem, em condições

de águas paradas (i.e. sem ondas) e para a profundidade de água de teste. A técnica utilizada consistiu na aplicação de uma força (ou momento) no modelo, que relativamente à sua posição inicial de repouso, o movimentava de um determinado deslocamento (ou ângulo). Após esta fase, a força (ou momento) é retirada, passando o navio amarrado a oscilar em torno da sua posição de equilíbrio. Este procedimento é repetido para cada um dos seis graus de liberdade do navio. Estas experiências permitem também avaliar o nível de amortecimento associado aos diferentes modos de oscilação do navio. A Figura 13 apresenta, como exemplo, as curvas de decaimento das oscilações de avanço e de guinada. O decaimento logarítmico da oscilação é representado por  $\delta$ .

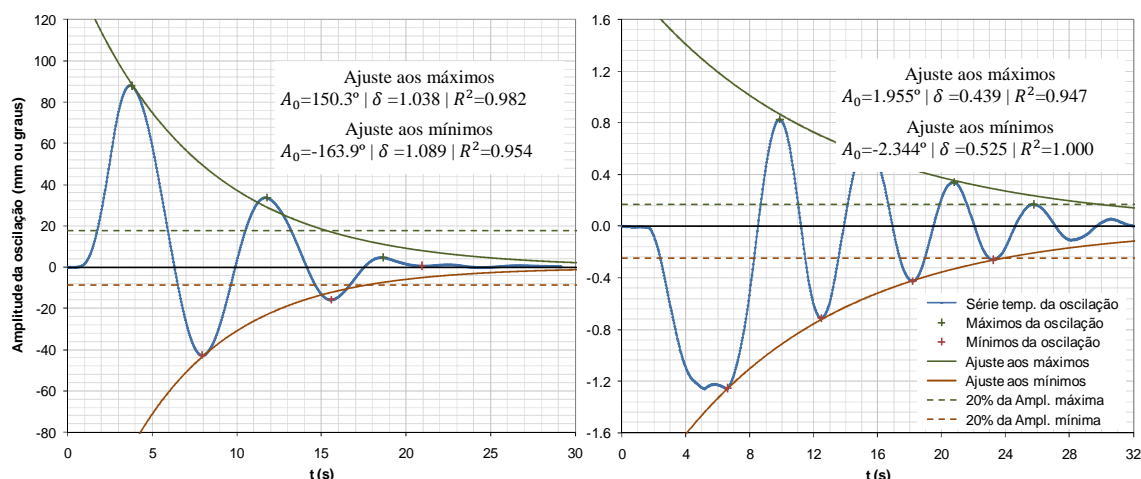


Figura 13 – Exemplos de curvas de decaimento “livre” das oscilações do navio amarrado (valores no modelo): oscilação de avanço (esquerda) e de guinada (direita).

Em síntese, o comportamento do navio segundo a horizontal é normalmente condicionado pelos períodos naturais de oscilação introduzidos pelo sistema de amarração, os quais tendem a ser significativamente maiores do que os períodos característicos da agitação. Consequentemente, os movimentos horizontais são dificilmente excitáveis por ondas regulares de curto período, por estas não possuírem energia na gama das baixas-freqüências.

Importa referir que um navio amarrado num porto pode apresentar uma resposta sub-harmónica (em freqüências inferiores às da agitação marítima) mesmo quando submetido apenas à acção de ondas regulares, devido à não-linearidade do sistema de amarração. Este tipo de resposta não foi, contudo, identificada nos resultados analisados, possivelmente pelo facto de os testes terem sido realizados com agitação de vante, a rigidez das defensas não ser muito diferente da dos cabos de amarração, ter-se utilizado uma “rigidez equivalente” para reproduzir as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração, e o coeficiente de atrito na interface do navio com as defensas ser pequeno.

### 3.2 Duração do teste e sequência temporal de ondas

A reprodução de estados de agitação marítima através da geração de sequências aleatórias de ondas pelo método do ruído branco constitui uma base sólida para o estudo do comportamento de bacias portuárias e dos navios amarrados no seu interior. No entanto, o comprimento dessas sequências deve ser suficientemente grande, para que os diferentes padrões de agrupamentos de ondas possam ocorrer durante o teste experimental, particularmente nas situações em que as ondas de longo período, e os efeitos associados aos grupos de ondas, são importantes. Se a sequência aleatória de ondas for curta, o padrão das ondas de longo período pode alterar-se, significativamente, com a modificação do seu comprimento. Como consequência, a resposta de longo período da bacia portuária, ou o comportamento dos navios amarrados no seu interior, podem ser influenciados.

Do exposto, e tendo em conta as especificidades relativas à geração de agitação irregular pelo método do ruído branco, resulta que quanto maior for o comprimento da sequência aleatória de ondas, mais rigorosamente os estados de agitação marítima são reproduzidos, em particular as

componentes de mais baixa-frequência do espectro. Além disso, a máxima altura de onda numa série temporal de ondas é função da sua duração (Matsumi *et al.*, 2004, e Kirkegaard, 2007).

Assim, pretende-se analisar, para as condições de teste indicadas no Quadro 5, a influência da duração dos testes experimentais (tempestade) e da sequência temporal de ondas geradas, na energia de baixa-frequência dos estados de agitação marítima reproduzidos e nos parâmetros caracterizadores da resposta do navio amarrado. Os estados de agitação foram definidos com base na forma espectral de JONSWAP (factor de forma igual a 3.3). O Quadro 5 apresenta as alturas de onda significativas incidentes,  $H_{S,i}$ , e os períodos de onda de pico,  $T_p$ , considerados na primeira e na segunda fases do estudo. Importa ainda frisar que o espectro especificado no sistema de geração de ondas foi o mesmo nos testes realizados para cada uma dessas fases.

Quadro 5 – Condições de teste analisadas: comprimento das sequências aleatórias, duração do teste, alturas de ondas registadas.

$n$		10	11	12	13	2x12	14	4x12	15
$2^n$		1024	2048	4096	8192	2x4096	16384	4x4096	32768
Nº de ondas (>)		150	300	625	1250	1250	2500	2500	5000
	Teste ID	T33	T32	T27	T28	T29	T30	T31	--
1ª Fase ( $T_p=12$ s) ( $H_{S,i} \cong 2.0$ m)	Duração (s)	1536	3072	6144	12288	12288	24576	24576	--
	Duração (h)	<b>0.43</b>	<b>0.85</b>	<b>1.71</b>	<b>3.41</b>	<b>3.41</b>	<b>6.83</b>	<b>6.83</b>	--
	$H_{S,i}$ (m)	1.97	1.98	2.00	1.98	1.99	1.95	1.98	--
	$H_{m\acute{a}x}$ (m)	2.93	3.01	3.29	3.92	3.25	3.70	3.27	--
	Teste ID	T06	T05	T04	T02	--	T03	--	T07
2ª Fase ( $T_p=16$ s) ( $H_{S,i} \cong 3.0$ m)	Duração (s)	2048	4096	8192	16384	--	32768	--	65536
	Duração (h)	<b>0.57</b>	<b>1.14</b>	<b>2.28</b>	<b>4.55</b>	--	<b>9.10</b>	--	<b>18.20</b>
	$H_{S,i}$ (m)	3.03	3.04	3.07	3.00	--	3.02	--	3.03
	$H_{m\acute{a}x}$ (m)	5.26	5.15	5.34	5.51	--	5.69	--	5.56

Não é objectivo deste trabalho abordar a técnica de geração de agitação irregular pelo método do ruído branco filtrado. No entanto, importa referir que o tempo que uma sequência aleatória de ondas demora até se repetir – tempo de ciclo, se relaciona com o valor de  $n$ , e com o período de onda de pico, através da seguinte relação,

$$T_{ciclo} = 2^n \frac{T_p}{8}$$

A duração dos testes experimentais é a que corresponde à duração de um ciclo (tempo de ciclo) ou à repetição de uma sequência aleatória base (múltiplo do tempo de ciclo base), Quadro 5. De forma a assegurar que um estado de agitação é medido sem incerteza estatística, o tempo de aquisição deverá ser igual à duração do ciclo (ou múltiplo). A Figura 14 clarifica os conceitos de série temporal aleatória de ondas (sem repetição) e série temporal de ondas obtida a partir da repetição de uma sequência aleatória base.

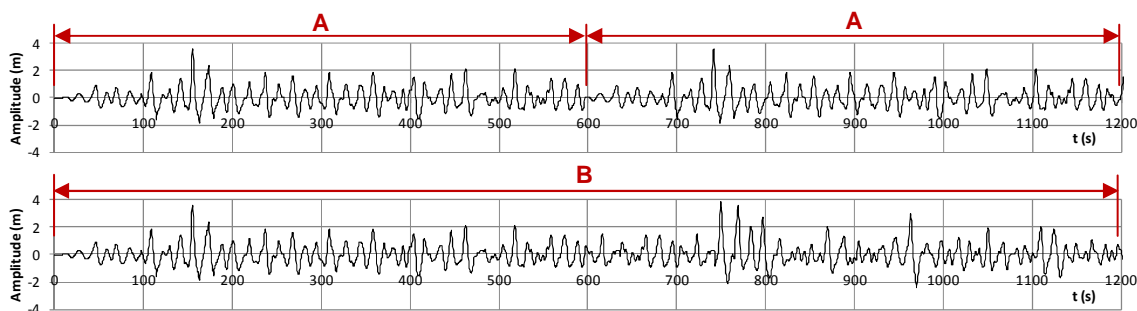


Figura 14 – Exemplos de séries temporais de ondas: repetição da sequência aleatória base “A” (superior); sequência aleatória sem repetição “B” (inferior). Testes com a mesma duração total.

A Figura 15 apresenta os espectros de variância associados aos testes efectuados durante a segunda fase do estudo, Quadro 5, considerando comprimentos da sequência aleatória entre  $2^{10}$  e  $2^{15}$ . Estes espectros foram estimados com base nos registos da sonda S1 (Figura 9), para um tamanho da janela de dados 1024 pontos e uma largura da janela espectral de 0.002344 Hz.

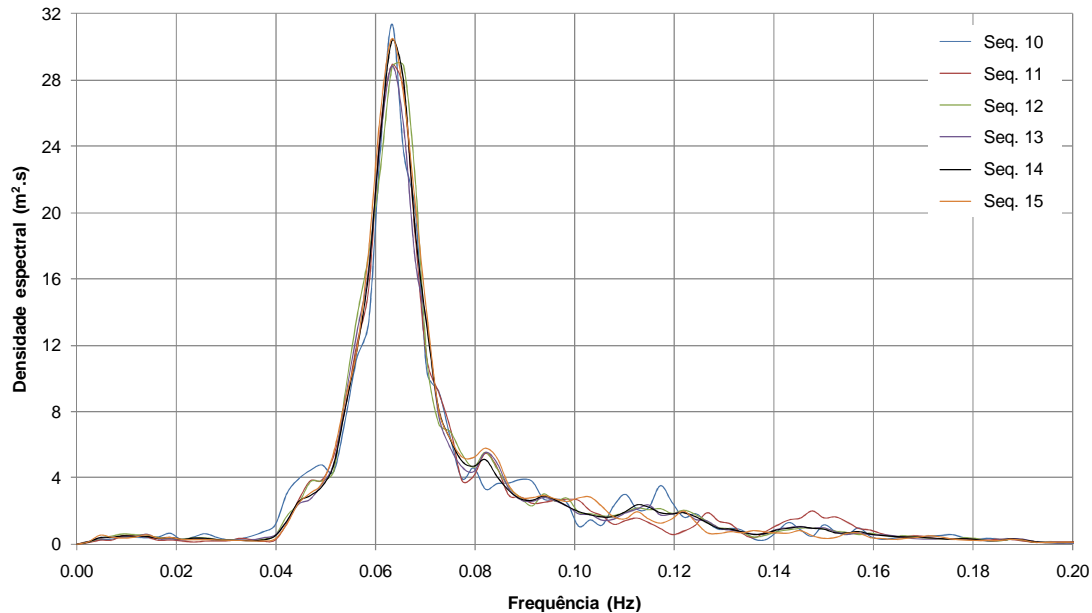


Figura 15 – Espectros de variância estimados com base em resultados de testes realizados na segunda fase do estudo, considerando sequências aleatórias de comprimentos entre  $2^{10}$  e  $2^{15}$ .

Os espectros apresentados na Figura 15 são muito semelhantes. Em termos globais, o espectro associado à sequência  $2^{10}$  (teste de menor duração) é o que mais se afasta dos restantes. Como os navios amarrados apresentam um conjunto de frequências naturais que podem ser excitadas pela energia de baixa-frequência da agitação marítima, a Figura 16 apresenta, em mais detalhe, a componente infra-gravítica dos espectros apresentados na Figura 15. Considerou-se que essa componente incluía frequências entre 0 e 0.04 Hz, ou seja, períodos de onda superiores a 25 s.

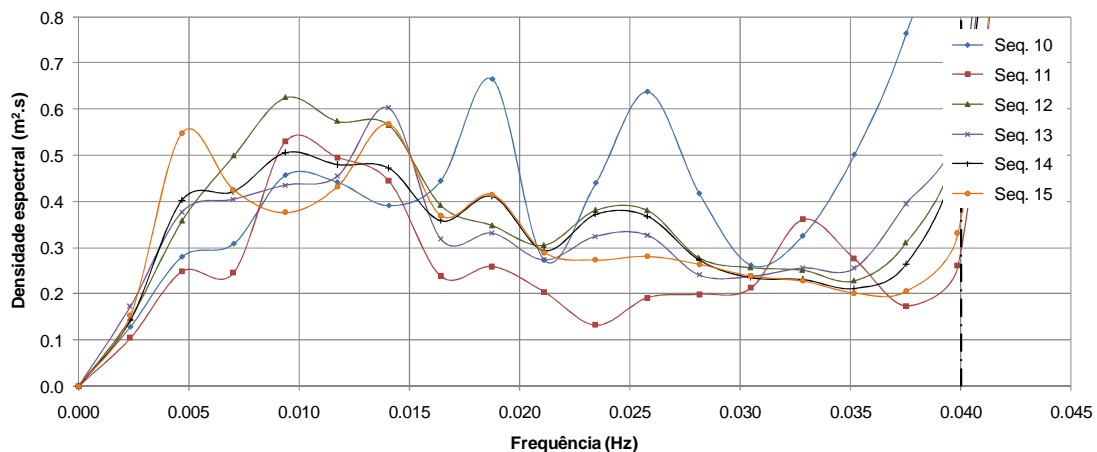


Figura 16 – Componente infra-gravítica dos espectros de variância estimados com base em resultados de testes realizados na segunda fase do estudo, para sequências aleatórias de comprimentos de  $2^{10}$  a  $2^{15}$ .

A distribuição de energia pelas frequências da banda infra-gravítica dos espectros de variância não é uniforme e pode variar, significativamente, com o comprimento da sequência aleatória de ondas. A distribuição de energia associada à sequência  $2^{10}$  é, como se referiu anteriormente, a que mais se distancia das restantes.

O Quadro 6 apresenta a altura de onda significativa associada à componente infra-gravítica,  $H_{S,lp}$ , determinada com base no momento espectral de ordem zero,  $m_{0,lp}$ , calculado para frequências inferiores à de separação das componentes de curto e de longo períodos,  $f_{cp/lp}$ , através de,

$$m_{0,lp} = \int_0^{f_{cp/lp}} S(f) df \quad (1)$$

$$H_{S,lp} = 4\sqrt{m_{0,lp}} \quad (2)$$

Quadro 6 – Energia de baixa-frequência presente nos estados de agitação marítima estudados.

$n$		10	11	12	13	2x12	14	4x12	15	Média
$2^n$		1024	2048	4096	8192	2x4096	16384	4x4096	32768	
1ª Fase ( $T_p=12$ s) ( $H_{S,i} \cong 2.0$ m)	Teste ID	T33	T32	T27	T28	T29	T30	T31	--	
	$H_{S,i}$ (m)	1.97	1.98	2.00	1.98	1.99	1.95	1.98	--	
	$m_{0,lp}^{(1)}$	0.00494	0.00323	0.00402	0.003330	0.00368	0.00353	0.00377	--	
	$H_{S,lp}$ (m)	<b>0.281</b>	<b>0.227</b>	<b>0.254</b>	<b>0.231</b>	<b>0.243</b>	<b>0.238</b>	<b>0.246</b>	--	<b>0.246</b>
2ª Fase ( $T_p=16$ s) ( $H_{S,i} \cong 3.0$ m)	Teste ID	T06	T05	T04	T02	--	T03	--	T07	
	$H_{S,i}$ (m)	3.03	3.04	3.07	3.00	--	3.02	--	3.03	
	$m_{0,lp}^{(1)}$	0.0185	0.0107	0.0151	0.0140	--	0.0140	--	0.0131	
	$H_{S,lp}$ (m)	<b>0.545</b>	<b>0.414</b>	<b>0.491</b>	<b>0.473</b>	--	<b>0.473</b>	--	<b>0.458</b>	<b>0.475</b>

**Nota:** <sup>(1)</sup> valores relativos, apenas, aos registos da Sonda S1 (Figura 9). Em Rosa Santos, 2010, apresentaram-se algumas considerações sobre a análise do conteúdo energético de baixa-frequência dos estados de agitação marítima reproduzidos numa instalação experimental. Considera-se que a abordagem utilizada no presente trabalho é adequada aos objectivos do estudo.

Apesar de o número de condições de teste analisadas ser limitado, os resultados apresentados mostram que a altura de onda significativa associada à componente infra-gravítica do espectro tende a estabilizar com o aumento do comprimento da sequência aleatória de ondas (duração do teste). Na análise apenas foram consideradas sequências de comprimento igual ou superior a  $2^{10}$  (que corresponde, aproximadamente, a 150 ondas). Para sequências mais curtas, as diferenças seriam, previsivelmente, maiores.

Conclui-se, assim, que quanto maior for o comprimento da sequência aleatória de ondas, mais rigorosamente os estados de agitação são reproduzidos, em particular as suas componentes de frequência mais baixa, essenciais no estudo do comportamento de navios amarrados em portos. No entanto, a duração dos testes pode ser condicionada pelas reflexões da agitação gerada nas fronteiras da instalação experimental, que podem “contaminar” a agitação incidente e influenciar a resposta do navio amarrado, prejudicando a qualidade dos resultados experimentais.

Na Figura 16 não foram observadas concentrações muito elevadas de energia nas frequências da banda infra-gravítica dos espectros. Por outro lado, não se verificou um aumento da energia de baixa-frequência com o aumento da duração do teste, Quadro 6. Assim, embora não se possa afirmar, de forma categórica, que não ocorreram fenómenos de índole ressonante na instalação experimental, estes, caso tenham existido, devem ter tido pouca influência nos resultados. Este tema foi abordado, em mais detalhe, em Rosa Santos, 2010. Importa referir que foram tomadas medidas tendo em vista a minimização desse tipo de fenómenos, nomeadamente: a utilização de um sistema de absorção activa de reflexões, instalação de elementos absorventes nas fronteiras mais problemáticas da instalação experimental, e o controlo das condições de agitação geradas em cada um dos testes.

Os resultados apresentados mostram que para comprimentos da sequência aleatória superiores a  $2^{11}$  (ou  $2^{12}$ ) não se verificam alterações importantes da altura de onda significativa associada à componente infra-gravítica, Quadro 6, embora se tenham observado diferenças na distribuição da energia pelas frequências da banda infra-gravítica do espectro, Figura 16.

Importa ainda analisar a influência na resposta do navio da duração dos testes experimentais e da sequência temporal de ondas. Os testes foram efectuados com o modelo do navio calibrado para a condição de carga máxima e amarrado com o *layout* assimétrico, Figura 4. As forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração foram ajustadas a valores entre 100 e 120 kN. A profundidade de água junto ao cais era de 20 m (preia-mar de águas vivas). Nos testes relativos à primeira fase do estudo utilizaram-se defensas de baixo atrito ( $\mu = 0.12$ ) e as características do sistema de amarração são as indicadas no Quadro 2, para a condição (1). Na segunda fase do estudo reproduziram-se defensas de atrito elevado ( $\mu = 0.46$ ) e o sistema de amarração com as características referenciadas por condição (2) no Quadro 2.

A Figura 17 apresenta a amplitude dos movimentos do navio amarrado, em função da duração do teste (tempo de ciclo), para as condições estudadas na primeira e segunda fases do estudo (Quadro 5). A duração dos testes resulta da consideração de sequências aleatórias de  $2^{10}$  a  $2^{15}$ , sem repetição. É ainda apresentada a linha de tendência que resulta da realização de um ajuste linear, pelo método dos mínimos quadrados, aos resultados obtidos.

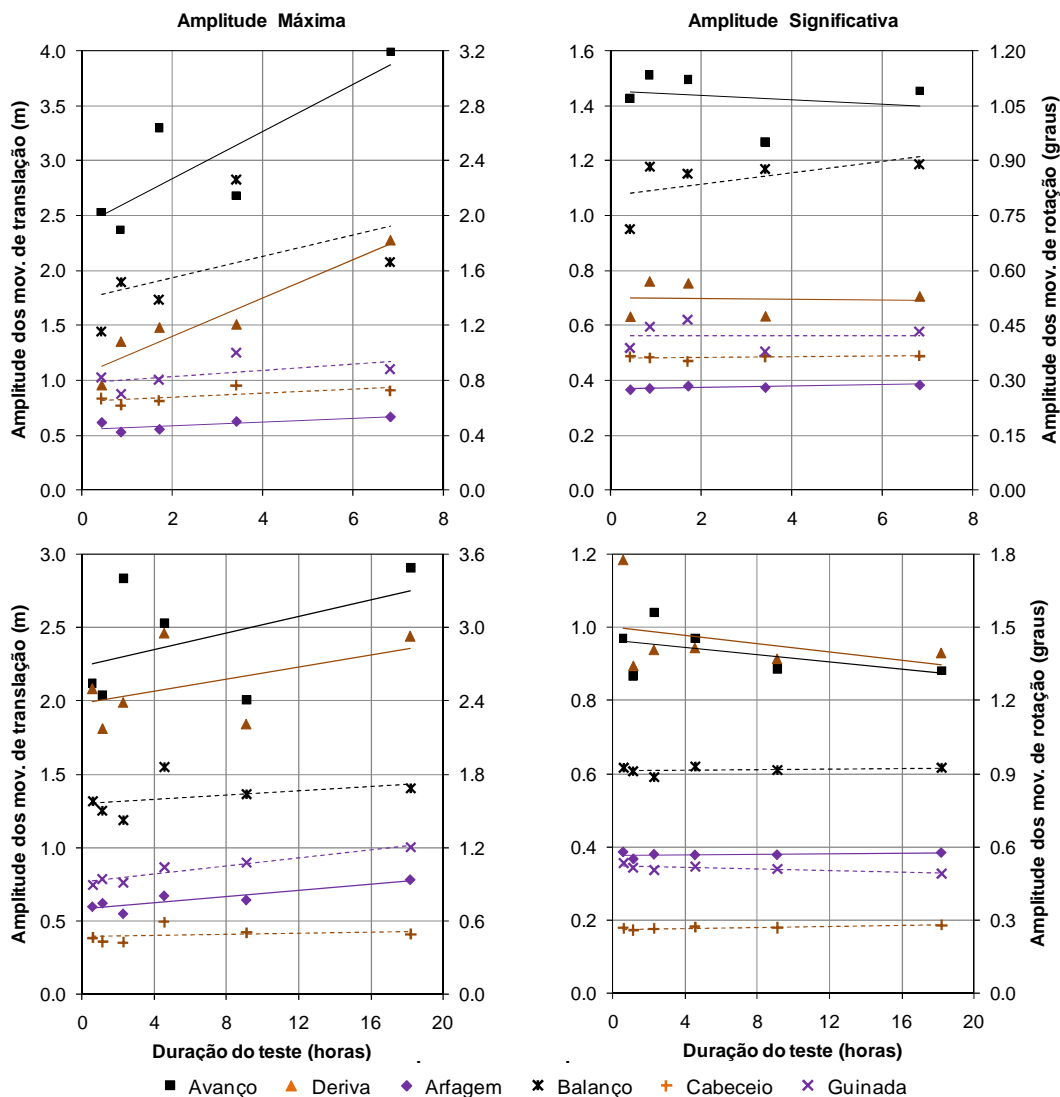


Figura 17 – Amplitude dos movimentos do navio amarrado em função da duração do teste: amplitudes ‘pico-a-pico’ máximas (esquerda) e significativas (direita). Resultados da primeira (superior) e segunda (inferior) fases do estudo experimental. Ajuste linear aos valores obtidos.

Apesar de as alturas de onda significativas e os espectros de variância da agitação incidente no modelo serem idênticos nos testes efectuados em cada uma das fases do estudo, verifica-se que

a amplitude máxima dos movimentos do navio varia, significativamente, com a duração do teste (tempo de ciclo). A variação da amplitude significativa dos movimentos é menor, especialmente quando se consideram, apenas, os testes de maior duração. Esta tendência mantém-se quando são analisadas as amplitudes médias dos movimentos do navio (resultados não apresentados).

Uma vez que são as amplitudes máximas dos movimentos do navio que mais condicionam as condições operacionais e de segurança dos terminais portuários, resulta que quanto maior for a duração do teste maior é a garantia de que os resultados experimentais são conservativos. No entanto, importa fazer referência à assinalável dispersão dos resultados em torno das linhas de tendência apresentadas na Figura 17.

Importa acrescentar que a altura de onda significativa associada à componente infra-gravítica não aumentou com a duração dos testes, Quadro 6. No entanto, verificou-se uma tendência de aumento da altura de onda máxima da sequência temporal de ondas com a duração do teste (i.e. tempo de ciclo), Quadro 5.

O método do ruído branco filtrado determina, de uma forma implícita, a distribuição estatística dos grupos de onda. No entanto, a duração dos testes deve ser suficientemente grande para que os diferentes agrupamentos de ondas sejam reproduzidos, e a resposta do modelo (e.g. navio) a esses agrupamentos possa ser registada. Assim, desde que se realizem testes razoavelmente longos, não é necessária informação de base sobre os agrupamentos de ondas dos estados de agitação reais.

O Quadro 7 apresenta alguns parâmetros do ajuste linear às amplitudes máxima e significativa dos movimentos, Figura 17, segundo os seis graus de liberdade do navio ( $m$  e  $R^2$  representam o declive da recta de ajuste e o quadrado do coeficiente de correlação, respectivamente).

Quadro 7 – Parâmetros do ajuste linear às amplitudes dos movimentos do navio amarrado.

Tipo de Movimento	1ª Fase				2ª Fase			
	Ampl. Máxima		Ampl. Significativa		Ampl. Máxima		Ampl. Significativa	
	$m$	$R^2$	$m$	$R^2$	$m$	$R^2$	$m$	$R^2$
Avanço	<b>0.2132</b>	0.6923	<b>-0.0082</b>	0.0477	<b>0.0282</b>	0.2206	<b>-0.0048</b>	0.2296
Deriva	<b>0.1749</b>	0.9030	<b>-0.0012</b>	0.0025	<b>0.0207</b>	0.2415	<b>-0.0057</b>	0.1285
Arfagem	<b>0.0160</b>	0.5580	<b>0.0021</b>	0.6409	<b>0.0102</b>	0.7741	<b>0.0004</b>	0.1319
Balanço	<b>0.0775</b>	0.2376	<b>0.0154</b>	0.2916	<b>0.0087</b>	0.1510	<b>0.0006</b>	0.0667
Cabeceio	<b>0.0153</b>	0.4730	<b>0.0011</b>	0.2154	<b>0.0026</b>	0.0813	<b>0.0009</b>	0.7098
Guinada	<b>0.0229</b>	0.2926	<b>-0.0004</b>	0.0006	<b>0.0167</b>	0.9221	<b>-0.0016</b>	0.5801

O Quadro 7 mostra, claramente, as tendências de variação das amplitudes dos movimentos do navio com o aumento do comprimento da sequência aleatória: o aumento da amplitude máxima, em particular do avanço e da deriva; uma pequena variação das amplitudes significativas, por vezes, até, uma ligeira redução; e uma dispersão considerável dos resultados relativamente às linhas de tendência apresentadas, que se traduz em coeficientes de correlação muito baixos.

A Figura 17 mostra também que o quociente entre a amplitude dos movimentos de deriva e de avanço é maior na segunda fase do estudo. Esta diferença resulta do facto de as condições de agitação na envolvente do Posto “A” se terem modificado, da primeira para a segunda fase do estudo. Enquanto na primeira fase o modelo foi testado sob a acção de ondas de crista longa de vante, na segunda fase, as condições de agitação na zona do cais resultam da difracção da agitação em torno da cabeça do quebramar Norte, e das reflexões no talude exterior do molhe Sul, na Praia de Matosinhos e noutras fronteiras físicas do domínio de ensaio. Isto significa que, na realidade, um navio amarrado no Posto “A” poderá experimentar movimentos de deriva com amplitudes apreciáveis sem que exista transmissão através do quebramar Norte de Leixões.

Os resultados apresentados mostram a importância de realizar testes experimentais tão longos quanto possível, de forma a caracterizar correctamente a resposta do navio amarrado. Quando se realizam estudos preliminares ou comparativos, para não aumentar muito a duração do plano de trabalhos, pode justificar-se a utilização de durações intermédias.

PIANC, 1995, apesar de estabelecer limites admissíveis para as amplitudes dos movimentos de diversos tipos de navios amarrados, não indica o período de tempo durante o qual os mesmos devem ser determinados nos estudos experimentais. Davies *et al.*, 2001, consideram provável que a referência a amplitudes máximas “pico-a-pico” tenha como finalidade a comparação com resultados de medições efectuadas em intervalos de tempo relativamente curtos, da ordem dos 20 min. Como se concluiu anteriormente, a duração dos testes é um aspecto muito importante neste tipo de estudos, na medida em que pode influenciar os resultados experimentais obtidos, particularmente as amplitudes máximas dos movimentos do navio. A adopção de durações tão pequenas pode ser contraproducente.

Nos testes analisados até ao momento a duração do teste experimental correspondia ao tempo de ciclo. No entanto, pode aumentar-se a duração do teste, não pelo aumento do comprimento da sequência aleatória (como analisado anteriormente), mas à custa da repetição de uma dada sequência aleatória base (Figura 14). A Figura 18 compara os resultados de testes efectuados a partir de sequências temporais de ondas baseadas na repetição da sequência aleatória base –  $2^{12}$  e de sequências temporais de ondas aleatórias ( $2^{13}$  e  $2^{14}$ ), isto é, sem repetição. Estes testes foram efectuados na primeira fase do estudo, para estados de agitação caracterizados por uma altura de onda significativa incidente de 2.0 m e um período de onda de pico de 12 s (Quadro 5).

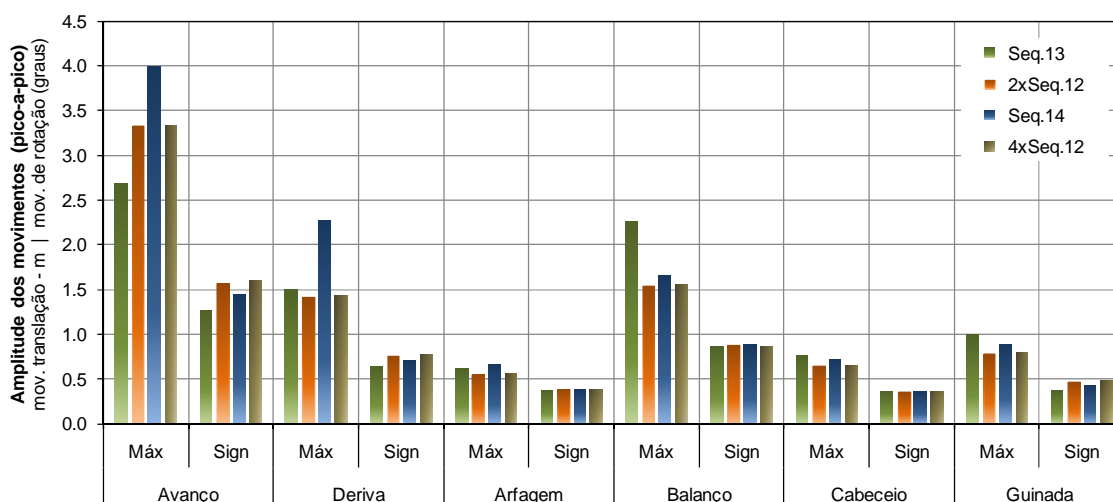


Figura 18 – Amplitudes máximas e significativas dos movimentos do navio em testes com a mesma duração, mas diferentes sequências de ondas:  $2^{13}$  versus  $2 \times 2^{12}$  e  $2^{14}$  versus  $4 \times 2^{12}$ .

A Figura 18 mostra, de forma clara, que quando se trata do estudo do comportamento de navios amarrados (em portos) não há qualquer vantagem em realizar testes experimentais muito longos se a série temporal de ondas utilizada consistir na repetição de uma sequência de ondas base (aleatória). De facto, observam-se diferenças significativas nas amplitudes máximas registadas quando se consideram as sequências aleatórias  $2^{13}$  e  $2^{14}$ , como já foi concluído anteriormente. Contudo, os resultados dos testes efectuados com base na repetição da sequência base –  $2^{12}$ , duas ou quatro vezes, são semelhantes, e claramente diferentes dos obtidos nos testes em que se consideraram as sequências  $2^{13}$  e  $2^{14}$ . As diferenças discutidas perdem importância quando se analisam as amplitudes significativas dos movimentos do navio amarrado. Importa acrescentar que os quatro testes analisados foram realizados para estados de agitação caracterizados pelo mesmo espectro de variância.

A semelhança entre os resultados obtidos para as sequências temporais  $2 \times 2^{12}$  e  $4 \times 2^{12}$  não é de estranhar. De facto, uma das características da técnica de geração de sequências aleatórias de ondas pelo método do ruído branco filtrado digitalmente é a sua “repetibilidade”, que se traduz na possibilidade de especificar um ponto de partida para a “construção” da sequência aleatória. Se esse ponto (número binário) não for alterado, o *output* do sistema de geração de ondas, para uma determinada condição de teste, também não se modifica. As sequências  $2^{12}$ ,  $2 \times 2^{12}$  e  $4 \times 2^{12}$  foram definidas com base no mesmo ponto de partida. Assim, os agrupamentos de ondas a que o modelo foi submetido foram os mesmos em qualquer um desses testes (ver Figura 14).

A análise de resultados de testes efectuados para as mesmas condições de ensaio, e utilizando a mesma sequência aleatória de ondas, permitiria tirar conclusões idênticas. Nestas situações, a eventual existência de diferenças entre os resultados pode dever-se ao facto de as amplitudes máximas dos movimentos do navio amarrado serem, intrinsecamente, estatísticas extremas e à não-linearidade do próprio comportamento do navio.

As conclusões aqui apresentadas não são directamente aplicáveis a modelos cujas condições se alteram, de uma forma progressiva, durante o teste (e.g. análise da progressão dos estragos produzidos pela agitação marítima num quebramar), embora devam ser tidas em consideração.

#### 4 ESTUDO DO TERMINAL DE PETROLEIROS DE LEIXÕES

No âmbito do estudo, em modelo físico, do comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões foram analisadas séries de testes de natureza académica (secção 3) e outras de carácter mais prático. Esta secção apresenta conclusões obtidas ao nível da compreensão da influência de alguns fenómenos nas condições operacionais do Posto “A” e da análise da eficácia de intervenções passíveis de serem implementadas nesse posto.

##### 4.1 Condições de tranquilidade na área abrigada pelo quebramar Norte

A análise da difracção da agitação em torno da cabeça do quebramar Norte de Leixões permitiu aferir o grau de abrigo do Posto “A” para as diferentes condições de teste estudadas, as quais incluíram três profundidades de água junto ao cais. Foram analisados cinco pontos do domínio de ensaio: quatro na zona abrigada pelo quebramar (S6 a S9) e um numa posição frontal à Praia de Matosinhos (S5), Figura 19. Os testes foram realizados com o cais do Posto “A” livre.

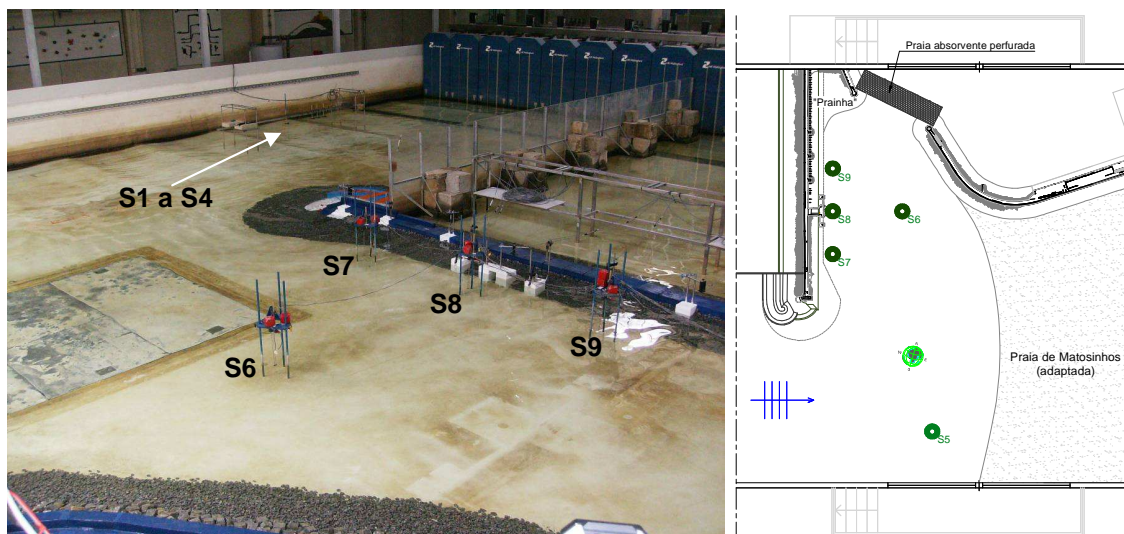


Figura 19 – Posição das sondas de níveis hidrodinâmicos utilizadas no estudo das condições de agitação junto ao Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões.

A análise que se apresenta é baseada num índice de agitação, que representa o quociente entre a altura de onda significativa num determinado ponto do modelo e a altura de onda significativa média calculada para as sondas instaladas junto ao sistema de geração (S1 a S4), e foi realizada para a altura de onda significativa total e, de forma independente, para as componentes de curto e de longo períodos, as quais podem apresentar comportamentos diferentes no modelo físico.

Na zona abrigada pelo quebramar Norte, a sonda instalada no local mais exposto (S6) foi a que apresentou os índices de agitação total (componentes de curto e longo períodos) mais elevados. Esse índice de agitação aumentou com a aproximação à cabeça do quebramar e com o período de onda de pico. As tendências referidas foram observadas para as três profundidades de água.

A Figura 20 mostra a variação dos índices de agitação relativos à componente de curto período,  $Y_{cp}$ , e à componente de longo período,  $Y_{lp}$ , com o local de instalação da sonda, a profundidade de água,  $d$ , e o período de onda de pico (valores do protótipo).

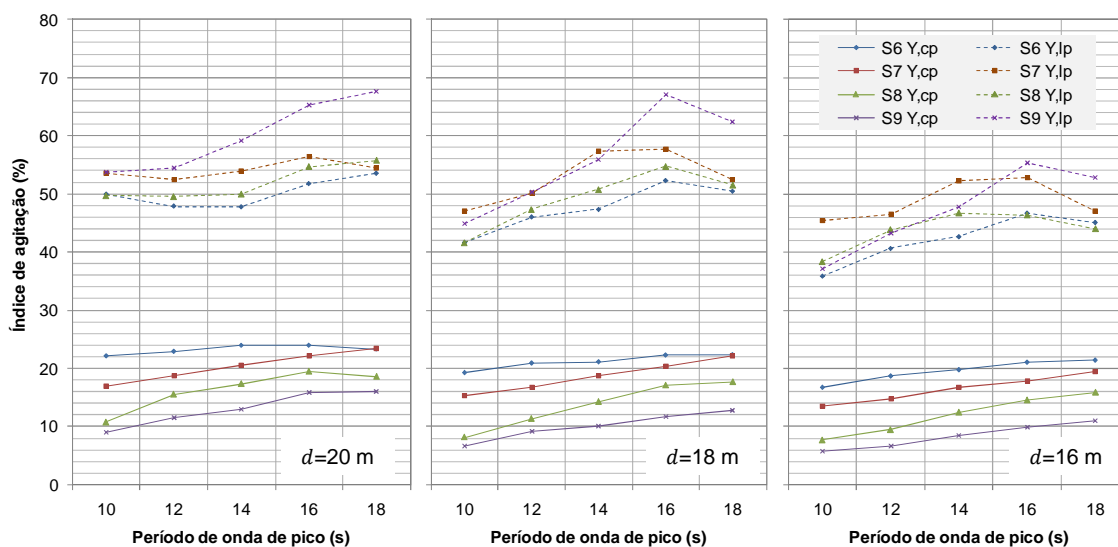


Figura 20 – Índices de agitação associados às componentes de curto e de longo períodos, para as três profundidades de água:  $d=20$  m (esquerda),  $d=18$  m (centro) e  $d=16$  m (direita). Testes efectuados para uma altura de onda significativa incidente de 3.0 m, na segunda fase do estudo experimental.

Em geral, verifica-se que a redução da profundidade de água conduz à diminuição dos índices de agitação associados às sondas S6 a S9, e que os níveis de agitação na área envolvente ao Posto “A” são mais influenciados pelo período de onda de pico do que pelo nível de maré.

A diminuição dos índices de agitação com a profundidade de água deve resultar, em parte, da presença de afloramentos rochosos, e outros materiais, no intradorso do quebramar Norte, junto à cabeça, que constituem obstáculos à propagação da agitação, particularmente para os níveis de maré mais baixos. De facto, a redução da profundidade de água teve um impacto menor nos índices de agitação de curto período (Figura 20) e total (resultados não apresentados) do local mais exposto (S6).

As ondas de curto período sofrem maior atenuação do que as de longo período na propagação para o interior do porto, qualquer que seja o período de onda ou a profundidade de água, Figura 20. Os elevados índices de agitação da componente infra-gravítica devem resultar do facto de uma parte significativa da energia associada às ondas de longo período ligadas se libertar no processo de difracção das ondas de curto período, e passar a propagar-se na forma de ondas livres, e de a energia de longo período (livre) reflectida ou radiada pela Praia de Matosinhos e pelo talude exterior do molhe Sul se poder propagar em direcção ao Posto “A”, Figura 9.

Na área abrigada pelo quebramar, a importante redução de energia nas frequências da banda gravítica (componente de curto período) contrasta com a aparente facilidade com que as ondas de longo período contornaram a cabeça dessa obra. Estes resultados permitem assim concluir que o aumento da dimensão das estruturas de abrigo portuário, para além do que é requerido pela necessidade de proporcionar as condições de tranquilidade pretendidas (para as ondas de curto período), é, não apenas caro, mas também pouco eficaz.

#### 4.2 *Layout de amarração actual versus layout de amarração simétrico*

O *layout* mais frequentemente utilizado na amarração dos navios de maior porte no Posto “A” é ligeiramente assimétrico, o que contraria uma das recomendações da OCIMF, 2008. Por esse motivo, foi estudado um *layout* alternativo para este posto, que utiliza o gancho localizado junto à extremidade do quebramar Norte para a amarração de um dos lançantes de proa “CA8”, Figura 4. Este *layout* é aproximadamente simétrico.

O estudo comparativo desses *layouts* foi realizado com base em resultados da primeira fase do trabalho, tendo sido analisadas as forças aplicadas nos elementos do sistema de amarração e a amplitude dos movimentos do navio. Verificou-se que a substituição do *layout* de amarração mais habitual no Posto “A” por um *layout* simétrico tinha pouca influência no comportamento do navio, quer em termos da grandeza das forças de amarração, quer no que concerne à amplitude

dos seus movimentos. Importa acrescentar que os dois *layouts* estudados diferiam, apenas, no posicionamento de um cabo de amarração duplo. Pôde verificar-se que as forças de amarração do navio e a amplitude dos seus movimentos estavam intimamente relacionadas. Além disso, os modos de oscilação horizontal do navio encontram-se acoplados por efeito do sistema utilizado na sua amarração. A análise pormenorizada dos resultados do estudo pode ser encontrada em Rosa Santos *et al.*, 2008, ou Rosa Santos, 2010.

#### 4.3 Folga sob a quilha do navio e profundidade de água junto ao cais

As dimensões dos navios que podem entrar, em segurança, num porto e acostar nos terminais existentes são condicionadas, por vezes, pelas profundidades de água disponíveis. Além disso, a resposta do navio amarrado no cais é influenciada pela folga sob a quilha, que pode variar com a alteração do nível de maré ou a modificação do estado de carga do navio.

O estudo efectuado mostrou que a profundidade de água junto ao Posto “A” e, portanto, a folga sob a quilha, têm uma grande influência no comportamento de um navio amarrado. A passagem de uma profundidade de água de 20 para 18 m, resultou num importante aumento das forças aplicadas nos elementos do sistema de amarração do navio e das amplitudes significativas dos seus movimentos horizontais.

Embora a diminuição da folga sob a quilha resulte num aumento da inércia adicionada do navio e dos factores de amortecimento da sua resposta (em relações aos valores de águas profundas), o aumento de energia nas frequências da banda infra-gravítica dos estados de agitação marítima reproduzidos com a redução da profundidade de água, explica os resultados obtidos, Figura 21. De facto, os navios amarrados são muito sensíveis à energia presente nessas frequências do espectro. Importa realçar que estas conclusões se baseiam em resultados de testes efectuados na primeira fase do estudo, com um modelo físico simplificado (secção 2.4), que não reproduzia todos os fenómenos físicos que influenciam as condições operacionais do Posto “A”. A análise pormenorizada dos resultados deste estudo pode ser encontrada em Rosa Santos, 2010.

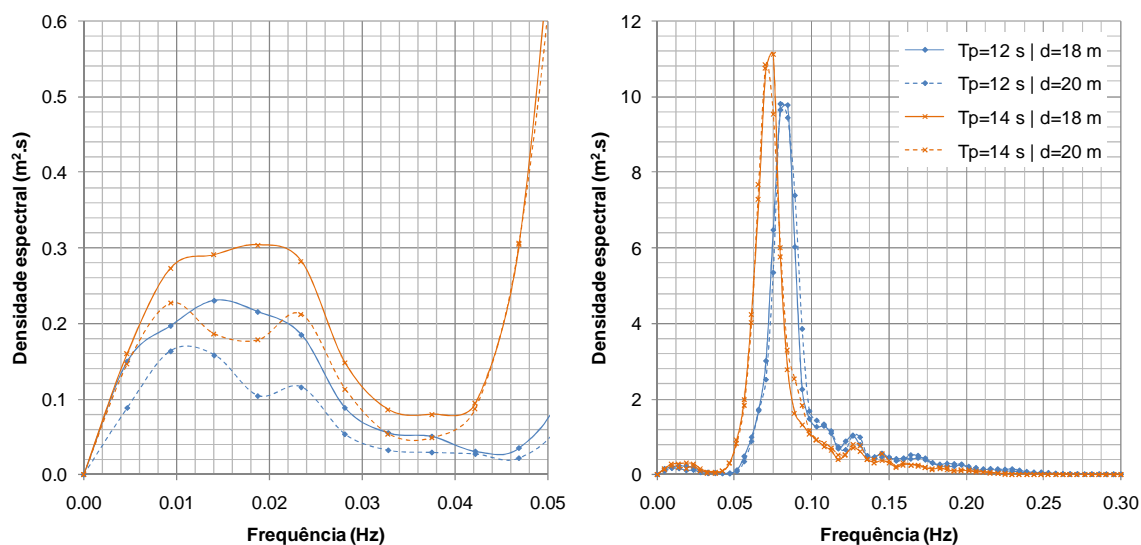


Figura 21 – Variação da energia associada às frequências da banda infra-gravítica com a profundidade de água na instalação experimental (esquerda) e espectros de variância correspondentes (direita).

#### 4.4 Forças de pré-tensão e tipo de interface “navio-defensas”

O aumento das forças de pré-tensão aplicadas nos traveseiros potencia o contacto do navio com as defensas, permitindo que as forças de atrito desenvolvidas nessa interface contribuam, de um modo mais efectivo, para a redução da amplitude dos seus movimentos de avanço. A utilização de defensas com um coeficiente de atrito elevado na interface com o navio constitui uma solução alternativa para aumentar as forças de atrito referidas. A secção 2.2 apresenta informação sobre as duas condições de pré-tensão e os dois tipos de interface considerados neste estudo. Estas condições foram analisadas nas duas fases do estudo experimental.

Verificou-se ainda que, devido ao efeito de acoplamento introduzido pelo sistema de amarração nos modos de oscilação horizontais, o aumento das forças de atrito na interface “navio-defensas” permite reduzir a amplitude dos movimentos de deriva e guinada. A eficácia das intervenções no sistema de amarração consideradas diminuiu com o aumento do período de onda, pois nessas condições o navio tende a estar menos tempo em contacto com as defensas. Em geral, o sistema de amarração tem pouca influência nos movimentos verticais do navio, particularmente no caso da arfagem e do cabeceio. O balanço foi o modo de oscilação vertical mais influenciado pelas características do sistema de amarração. Importa referir que a componente do amortecimento das oscilações de balanço devida ao sistema de amarração tem um papel importante na redução da amplitude dessas oscilações na proximidade do seu período de ressonância.

Para concluir, a Figura 22 mostra que o aumento das forças de pré-tensão aplicadas nos traveses é mais eficaz quando as defensas instaladas no cais apresentam um coeficiente de atrito elevado na interface com o navio. De facto, o mesmo aumento de pré-tensão (a passagem da condição de pré-tensão base para a condição de pré-tensão extra) conduziu a reduções da amplitude do movimento de avanço 20% superiores (aproximadamente) quando as defensas instaladas eram de atrito elevado. No caso do movimento de deriva, a eficácia do aumento dessas forças de pré-tensão foi menos influenciada pelo coeficiente de atrito na interface “navio-defensas” (resultados não apresentados). Importa frisar que o efeito favorável associado ao desenvolvimento de forças de atrito elevadas nessa interface se faz sentir sobretudo segundo o modo de avanço. A análise dos resultados deste estudo encontra-se em Rosa Santos *et al.*, 2010, e Rosa Santos, 2010.

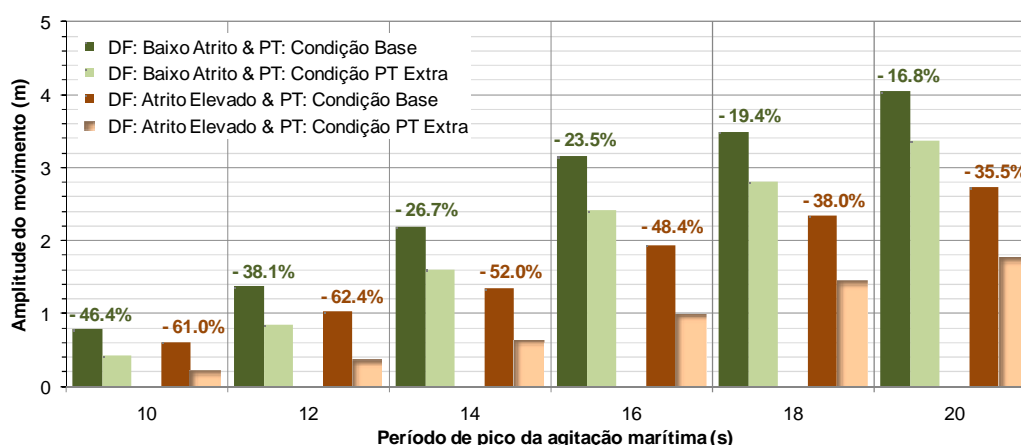


Figura 22 – Amplitude significativa das oscilações de avanço, para os sistemas de amarração considerados, em função do período de pico da agitação marítima. Segunda fase do estudo.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou a importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima nos estudos em modelo físico em que se pretende avaliar o comportamento de navios amarrados em portos. A utilização de agitação regular conduziu a uma significativa subavaliação da resposta do navio no plano horizontal (avanço, deriva e guinada). Estes movimentos são os que mais influem nas condições operacionais e de segurança de um terminal para navios do tipo petroleiro.

A técnica de geração de agitação irregular pelo método do ruído branco filtrado determina, de forma implícita, a distribuição dos grupos de onda. No entanto, a duração dos testes deve ser suficientemente grande, para que os diferentes agrupamentos de ondas sejam reproduzidos, e a resposta do modelo, a esses agrupamentos, possa ser registada. De facto, verificou-se que a amplitude máxima dos movimentos do navio variava com o tempo de ciclo (restantes condições de teste inalteradas), observando-se uma tendência geral de aumento. Como são as amplitudes máximas dos movimentos do navio que mais condicionam as condições de operacionalidade e de segurança dos terminais portuários, quanto maior for a duração do teste (i.e. o tempo de ciclo) maior é a garantia de que os resultados experimentais são conservativos. Por outro lado, e desde que se efectuem testes razoavelmente longos, não é necessária informação de base sobre os agrupamentos de ondas nos estados de agitação marítima reais. Pôde também concluir-se que

não há qualquer vantagem em efectuar testes muito longos se a sequência temporal de ondas utilizada consistir na repetição de uma sequência de ondas base (aleatória).

Por fim, foram apresentadas algumas das principais conclusões do estudo do comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões. Importa acrescentar que um dos objectivos desse estudo consistia na obtenção de resultados experimentais tendo em vista o desenvolvimento e validação de modelos numéricos de simulação do comportamento de navios amarrados em portos. Assim, os resultados do estudo experimental foram partilhados com os parceiros do projecto de I&D DOLPHIN (o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e o Centro de Engenharia e Tecnologia Naval do Instituto Superior Técnico) e, mais recentemente, ao abrigo de protocolos de cooperação internacionais, com a *Section of Ports and Waterways* da *Technical University of Delft, The Netherlands* (2010), e a *SOGREAH Consultants, France* (2011).

## AGRADECIMENTOS

Os resultados experimentais analisados foram obtidos no âmbito de uma tese de doutoramento (SFRH/BD/16671/2004) e do projecto DOLPHIN (PTDC/ECM/72835/2006), ambos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), e realizados com o apoio da Administração dos Portos do Douro e Leixões, SA. O sistema *Qualisys* foi emprestado pelo LNEG e IST-UTL.

## REFERÊNCIAS

- Bruun, P., 1983. *Mooring and Fendering Rational Principles in Design*. Proc. of the 8<sup>th</sup> International Harbour Congress, Antwerp, June 13-17.
- Davies, M.; MacDonald, N. & Cornett, A., 2001. *Optimization of Port Design Using Physical Modeling*. Proc. of the Ports '01: America's Ports – Gateways to the Global Economy, ASCE, Norfolk, Virginia, USA, April 29 - May 2, 16p.
- Hughes, S. A., 1993. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore, Vol.7. ISBN:981-02-1541-X.
- IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. *Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petroleiro do Porto de Leixões: Relatório de Síntese*. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 76p.
- Kirkegaard, J., 2007. *Guidelines for wave modelling in flumes and basins: Hydraulic model testing in waves*. HYDRALAB III, December 2007.
- Matsumi, Y.; Ohno, K.-I. & Kimura, A., 2004. *Minimum Number of Waves in Irregular Wave Trains for Laboratory Stability Tests of Armour Units*. Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE 2004), Lisbon, Portugal, Sept. 19-24, Vol.4, pp.3579-3591. ISBN:981-256-994-4.
- Moes, H. & Hough, G., 1999. *Measurement of Moored Ship Motions Using Video Imaging Technology*. Proc. of the 12<sup>th</sup> International Harbour Congress, Antwerpen, Belgium, September 12-16, pp.281-290.
- OCIMF, 2008. *Mooring Equipment Guidelines*. Oil Companies International Maritime Forum, Witherby Seamanship International, 3<sup>rd</sup> Ed., Livingston, United Kingdom, 278p. ISBN:978-1-905331-21-1.
- PIANC, 1995. *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, a Practical Guide*. Report of the WG24 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin N°88, PIANC, International Navigation Association, Brussels, Belgium, 35p. ISBN:2-87223-070-X.
- Rosa Santos, P.; Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F.; Guedes Soares, C.; Fonseca, N.; Alfredo Santos, J.; Paulo Moreira, A.; Costa, P. & Brògueira Dias, E., 2008b. *Physical Model Study of the Behaviour of an Oil Tanker Moored at a Jetty*. Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection – CoastLab08, Bari, Italy, July 2-5. ISBN:978-90-78046-07-3.
- Rosa Santos, P.; Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F. & Brògueira Dias, E., 2010. *Physical Modelling of Leixões Oil Terminal – Portugal*, Proc. of the Port Infrastructure Seminar, Delft, The Netherlands, June 22-23, 15p.
- Rosa Santos P., 2010. *Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Dez. 2010, 764p, 2 Vol.
- Rita, M. M., 1984. *On the Behaviour of Moored Ships in Harbours – Theory, Practice and Model Tests*. Tese para Especialista, Relatório 9/85, Núcleo de Praias e Portos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Van der Molen, W. & Moes, H., 2009. *General characteristics of South African ports and the safe mooring of ships*. Proc. of the 28<sup>th</sup> Annual Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, July 6-9, pp.308-314. ISBN:978-1-920017-39-2.