



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuaria Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

INFLUÊNCIA DO ATRITO DAS DEFENSAS NO COMPORTAMENTO DE UM NAVIO AMARRADO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE PRÉ-TENSÃO NOS TRAVESES

P. Rosa Santos, F. Veloso Gomes & F. Taveira Pinto
Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal
pjrs@fe.up.pt, vgomes@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt

E. Brogueira Dias
Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A.
Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, Portugal
brogueira.dias@apdl.pt

RESUMO

Nesta comunicação analisa-se a influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas, no comportamento de um navio petroleiro amarrado, para duas condições de pré-tensão nos cabos de amarração. A análise é efectuada com base nos resultados de testes em modelo físico do comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Esses testes foram realizados com dois modelos físicos construídos à escala geométrica 1/100. O primeiro corresponde a uma reprodução simplificada do Posto “A” e área envolvente, com o modelo do navio a ser ensaiado, exclusivamente, para ondas de vante. O segundo procura reproduzir as características do protótipo com maior rigor, e inclui o quebramar Norte (ou exterior), o molhe Sul, o antigo quebramar Norte (estrutura centenária), e uma extensão significativa da praia de Matosinhos.

1 INTRODUÇÃO

O Porto de Leixões, situado na costa noroeste de Portugal, é a segunda maior infraestrutura portuária do país, e possui um terminal de petroleiros constituído por três postos de acostagem. O Posto “A” é o que se encontra mais exposto às condições adversas do ambiente marítimo-portuário, apresentando, por vezes, alguns problemas de operacionalidade. Este posto de acostagem não assegura, em média, as condições de operacionalidade e de segurança durante 23% dos dias do ano, IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. Durante as situações mais críticas os navios amarrados neste posto de acostagem apresentam movimentos de elevada amplitude que poderão conduzir à rotura de cabos de amarração.

Com o intuito de melhorar as condições de operacionalidade e de segurança existentes no Posto “A”, a Autoridade Portuária adjudicou vários estudos ao longo dos últimos anos, que analisaram o problema segundo diferentes perspectivas. No seguimento desses estudos, iniciou-se em Janeiro de 2008 um projecto de I&D com o objectivo de melhor compreender as causas que estão na origem dos problemas de operacionalidade do Posto “A”, e analisar a eficácia de algumas alternativas de intervenção propostas nos estudos anteriores. Este projecto de investigação, que tem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia e do Porto de Leixões, recorre a uma metodologia que envolve o recurso à modelação física, o desenvolvimento e a aplicação de modelos numéricos, e a realização de medições de movimentos de navios amarrados em protótipo, ou seja, no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões.

Em particular, o presente trabalho procura analisar a influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas, no comportamento de um navio amarrado, para duas condições de pré-tensão nos cabos de amarração. A análise é efectuada com base em resultados de testes em modelo físico do comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Esses testes foram realizados com dois modelos físicos construídos à escala geométrica 1/100. O primeiro corresponde a uma reprodução simplificada do Posto “A” e área envolvente, com o modelo do navio petroleiro a ser ensaiado, exclusivamente, para ondas de vante. O segundo procura reproduzir as características do protótipo com maior rigor, e inclui o quebramar Norte (ou exterior), o molhe Sul, o antigo quebramar Norte (estrutura centenária), e uma extensão significativa da praia de Matosinhos.

Na análise é dado especial destaque aos movimentos do navio com maior influência nas condições de operacionalidade e de segurança de um terminal de petroleiros. São também apresentadas, sumariamente, as técnicas de medição utilizadas no estudo, bem como as metodologias de calibração do modelo físico.

2 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O Porto de Leixões situa-se no Norte de Portugal, na foz do Rio Leça, aproximadamente a 4,5 km a Norte da embocadura do Rio Douro. O terminal de petroleiros existente é constituído por três postos de acostagem, Figura 1. O Posto “A”, localizado na entrada do porto e paralelamente ao quebramar Norte, é o mais exposto às condições adversas do ambiente marítimo-portuário.



Figura 1 – Vista aérea do Porto de Leixões.

Na bacia de manobra associada ao Posto “A” os fundos de serviço são mantidos, sensivelmente, à cota -16 m (ZHL). Os postos de acostagem “B” e “C”, destinados a produtos refinados, estão localizados numa área portuária interior, e portanto mais protegida da acção directa da agitação marítima. Ao largo do Porto de Leixões foi recentemente instalado um sistema do tipo monobóia que procura proporcionar condições de descarga alternativas para a classe dos navios de maior porte que demandam a Leixões durante condições marítimas adversas.

O Posto “A” pode ser usado por uma gama variada de navios. Os navios de maior porte que normalmente usam este posto possuem um comprimento total de 250 m, um calado máximo de 14 m, e um deslocamento em carga máxima de cerca de 120 000 t. As características dos cabos de amarração disponíveis a bordo podem diferir de navio para navio, no entanto, os navios de maior porte que usam o Posto “A” recorrem, usualmente, a cabos de amarração em aço com extremidades de amarração em fibras sintéticas.

A estrutura de acostagem é composta por duques d'Alba de acostagem e de amarração, e por uma plataforma de descarga. Cada um dos duques d'Alba de acostagem e amarração está equipado com defensas do tipo pneumático e ganchos de amarração duplos. Os restantes pontos de amarração localizam-se ao longo da superestrutura do quebramar Norte, tal como esquematizado na Figura 2, que também apresenta o *layout* de amarração mais usual para os navios de maior porte que usam o Posto "A".

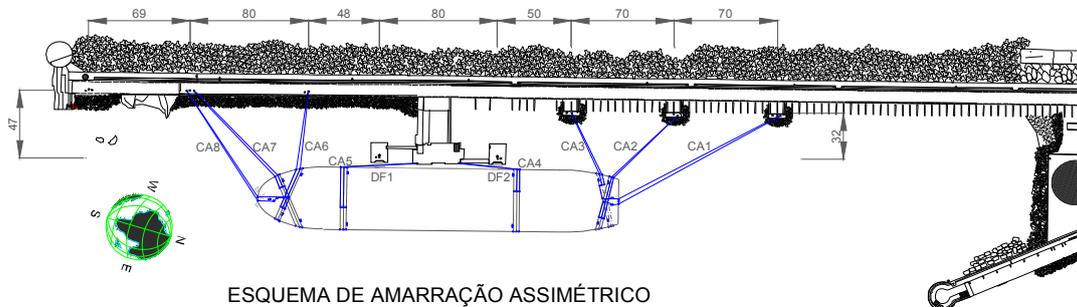


Figura 2 – *Layout* de amarração mais usual para os navios de maior porte que usam o Posto "A".

Devido essencialmente à sua localização, podem ocorrer alguns problemas hidrodinâmicos e operacionais no Posto "A", IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. Nas situações mais críticas os navios aí amarrados podem apresentar movimentos excessivos (eventualmente com rotura de alguns cabos de amarração), e as operações de carga e descarga do navio tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis de realizar em condições de segurança. Em algumas situações o navio é obrigado a abandonar o cais, e a esperar por melhores condições para retomar as operações de movimentação de graneis líquidos. Uma descrição detalhada das condições operacionais do Posto "A" pode ser encontrada em IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005 e Veloso Gomes *et al.*, 2005.

3 ESTUDO EM MODELO FÍSICO

3.1 Introdução

O estudo em modelo físico do comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões foi subdividido em duas fases, realizadas por ordem crescente de complexidade. Na primeira fase recorreu-se a um modelo físico simplificado do Posto "A" e área envolvente, com o modelo do navio petroleiro a ser ensaiado, exclusivamente, para ondas de vante. Os objectivos definidos para essa fase consistiam na clarificação da contribuição de alguns aspectos críticos (identificados em estudos anteriores) para as condições de operacionalidade e de segurança do Posto "A", na análise da eficiência e da adequação de algumas alternativas de intervenção propostas em estudos anteriores, bem como na apresentação de novas soluções de intervenção com base nos resultados obtidos.

Na segunda fase do estudo construiu-se, no tanque de ondas, um modelo físico que procurava reproduzir com maior rigor as características do protótipo. Este segundo modelo incluiu o quebramar Norte do Porto de Leixões, o molhe Sul, o antigo quebramar Norte (estrutura centenária), e uma extensão significativa da Praia de Matosinhos. Neste modelo, a agitação marítima gerada, após difracção em torno da cabeça do quebramar Norte, atinge o modelo do navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem. Dos objectivos estabelecidos para esta fase destacam-se: a análise crítica da contribuição de alguns fenómenos físicos para a inoperacionalidade do Posto "A" (os que requerem um estudo com um modelo físico a 3D), o estudo de alternativas de intervenção com um modelo físico mais próximo da realidade, e uma análise comparativa dos resultados obtidos com os resultados do modelo físico simplificado.

Está ainda prevista a construção de um novo modelo físico à escala geométrica 1/75. A comparação dos resultados obtidos com os modelos construídos a diferentes escalas permitirá avaliar a magnitude de eventuais efeitos de escala.

Neste artigo são apenas considerados os resultados dos testes realizados com o objectivo de avaliar a influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas, no comportamento de um navio amarrado, para duas condições de pré-tensão distintas.

3.2 Características comuns aos dois modelos físicos

As duas fases do estudo em modelo físico foram realizadas no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LH – FEUP). Este tanque de ondas possui 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade de 1,2 m.

O navio do tipo petroleiro seleccionado para este estudo pertence à classe dos navios de maior porte, que mais frequentemente utilizam o Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões. Este navio encontrava-se fretado, em exclusividade, pela *Galp Energia* e tem 105 000 t de peso bruto. O modelo físico do navio foi construído em plástico reforçado com fibra de vidro, a partir dos planos 2D do navio real, Rosa Santos *et al.*, 2007. O Quadro 1 apresenta as principais características deste navio para a condição de carga máxima, quer no protótipo, quer no modelo físico construído à escala geométrica 1/100.

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

Característica	Protótipo	Modelo
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	0,43 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 longitudinal do centro de impulsão	128,41 m	1,284 m
Período natural da oscilação de Rolo	12,5 s	1,25 s

Previamente à realização dos testes, o modelo físico do navio foi calibrado para a condição de carga máxima, de modo a assegurar que, para além das características geométricas do casco, o modelo reproduz também as propriedades estáticas e dinâmicas do navio de protótipo. A metodologia de calibração do navio foi apresentada em Rosa Santos *et al.*, 2007. O modelo físico do navio, depois de calibrado, foi amarrado à estrutura de acostagem e de amarração já instrumentada.

O *layout* de amarração seleccionado é ligeiramente assimétrico, e corresponde ao *layout* de amarração mais frequente usado pelos navios de maior porte que usam o Posto “A”, Figura 2. Esse *layout* é composto por 8 cabos de amarração duplos, e encontra-se esquematizado em detalhe na Figura 3.

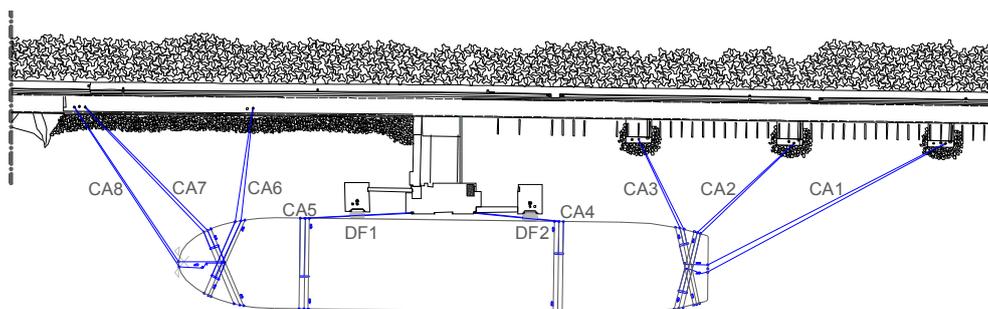


Figura 3 – *Layout* de amarração do navio, com identificação dos cabos de amarração e defensas.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

As características dos cabos utilizados na amarração de navios no Posto “A” podem variar, mas é frequente o uso de cabos de amarração em aço com extremidades em fibras sintéticas (usualmente a poliamida, embora outros materiais sintéticos possam também ser usados). As forças mínimas de rotura desses cabos estão, usualmente, compreendidas entre 650 e 900 kN. Neste estudo foram usados cabos de amarração com uma força mínima de rotura de 650 kN. As defensas instaladas no Posto “A” são do tipo pneumático, têm uma capacidade máxima de absorção de energia de 1300 kJ para uma deformação nominal de 55%, à qual está associada uma força de reacção no duque d’Alba de acostagem e amarração de 2450 kN.

As características elásticas dos cabos de amarração e das defensas reais foram simuladas usando uma combinação de molas helicoidais, e tomando também em consideração a rigidez do correspondente transdutor de força. Quer no caso dos cabos de amarração, quer no caso das defensas, o comportamento não linear das curvas força-deformação (relações constitutivas) foi linearizado, ou seja, a rigidez desses elementos (que é função da sua deformação) foi substituída pela rigidez constante de um cabo de amarração/defensa equivalente, com a mesma capacidade de absorção de energia do cabo de amarração/defensa não linear até à sua deformação limite. A elasticidade de cada um dos elementos do sistema de amarração foi verificada, por calibração, antes da realização dos testes em modelo físico. O Quadro 2 apresenta o comprimento dos cabos usados na amarração do modelo do navio, bem como a rigidez “linearizada” dos elementos do sistema de amarração (no modelo físico).

Quadro 2 – Características dos cabos de amarração e das defensas.

Cabo de Amarração & Defesa (ID)	Comprimento do cabo de amarração (m)	Rigidez (N/mm)
CA1	1,50	0,0169
CA2	0,90	0,0341
CA3	0,55	0,0498
CA4	0,55	0,0493
CA5	0,82	0,0344
CA6	0,82	0,0343
CA7	0,90	0,0341
CA8	1,20	0,0310
DF1	--	0,0865
DF2	--	0,0856

Com o objectivo de avaliar a influência do coeficiente de atrito, μ , no comportamento do navio amarrado, consideraram-se duas superfícies distintas de contacto com o casco do navio. A primeira resulta da utilização do dispositivo original de simulação de defensas, que apresenta uma extremidade de contacto com o navio em polietileno (defensas base). Para a simulação da segunda, a extremidade do dispositivo de simulação foi adaptada de modo a proporcionar maior atrito na interface com o casco do navio e, conseqüentemente, reproduzir condições mais próximas da realidade (defensas pneumáticas). A adaptação consistiu na aplicação de um recobrimento em borracha de *etileno-propileno-dieno* sobre a extremidade referida (defensas em EPDM). O Quadro 3 apresenta o ângulo e o coeficiente de atrito estático entre as duas superfícies de recobrimento das defensas e o casco do navio, em plástico reforçado com fibra de vidro. A metodologia de determinação do ângulo de atrito incluiu experiências em que a superfície de contacto estava seca ou molhada.

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

Material	Ângulo (°)	μ
Originais	6,1 – 7,3	0,11 – 0,13
EPDM	24,4 – 25,7	0,45 – 0,48

No início e no fim de cada série de testes verificou-se o estado de conservação do recobrimento aplicado às extremidades dos dispositivos de simulação das defensas. Esse recobrimento era substituído se tivesse sido atingido um determinado nível de desgaste.

A influência do coeficiente de atrito no comportamento de um navio amarrado no Posto “A” foi analisada para duas condições de pré-tensão nos cabos de amarração: na condição de pré-tensão base as forças iniciais (situação de repouso) em todos os cabos de amarração eram da ordem dos 100 a 120 kN; enquanto na condição de pré-tensão extra a força inicial nos traveses foi aumentada para um valor compreendido entre 245 e 265 kN, e mantiveram-se as forças nos restantes cabos de amarração no intervalo definido para a condição base. Estas forças de pré-tensão (valores de protótipo) referem-se a cada um dos dois cabos que são lançados em cada direcção para amarrar o navio ao cais. No modelo físico esses cabos são reproduzidos por apenas um, calibrado de forma a apresentar as características do par que representa. As forças iniciais nas defensas situavam-se entre 490 e 545 kN nos testes realizados para a condição de pré-tensão base, e entre 705 e 750 kN nos testes realizados para a condição de pré-tensão extra.

3.3 Primeira fase do estudo em modelo físico

Na primeira fase do estudo recorreu-se a um modelo físico simplificado do Posto “A” e área envolvente. Neste modelo apenas foram reproduzidas no tanque de ondas do LH – FEUP a localização e a geometria dos duques d’Alba de acostagem e de amarração, e as características elásticas dos cabos de amarração e das defensas. Como nesta fase se pretendia estudar o comportamento de um navio amarrado no Posto “A” sob a acção de ondas de vante, não houve necessidade de reproduzir o quebramar Norte de Leixões, que abriga este posto de acostagem da acção directa da agitação marítima predominante.

Os fundos na região adjacente ao quebramar Norte de Leixões foram considerados horizontais, e à cota de -16 m (ZHL). Dada a impossibilidade de reproduzir com o modelo físico construído o fenómeno da difracção em torno da cabeça do quebramar Norte, bem como eventuais reflexões no talude exterior do molhe Sul e na praia de Matosinhos, definiram-se condições de agitação marítima realistas, que tiveram em consideração a localização do Posto “A” e os resultados de simulações numéricas da propagação da agitação marítima para o interior do Porto de Leixões, IHRH-FEUP, 2004.

O modelo físico foi construído de acordo com a semelhança de *Froude*, para uma escala geométrica não distorcida igual a 1/100. O esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas encontra-se esquematizado na Figura 4.

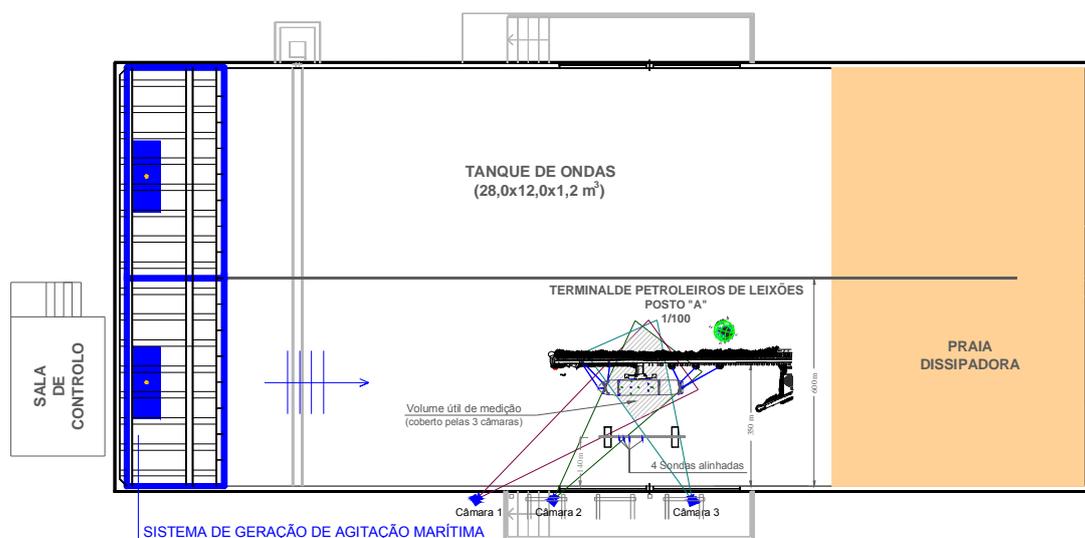


Figura 4 – Esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas: 1^a fase do estudo.

As condições de agitação marítima geradas foram medidas recorrendo a quatro sondas de níveis hidrodinâmicos localizadas nas proximidades do navio, mas suficientemente afastadas deste, de modo a ser possível considerar desprezável o efeito das perturbações induzidas pelos movimentos do navio no local de instalação das sondas, Figura 4. Ao fundo do tanque de ondas foi instalada uma praia de dissipação, para reduzir a reflexão da agitação marítima. A Figura 5 mostra o modelo físico do navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem com o *layout* assimétrico.

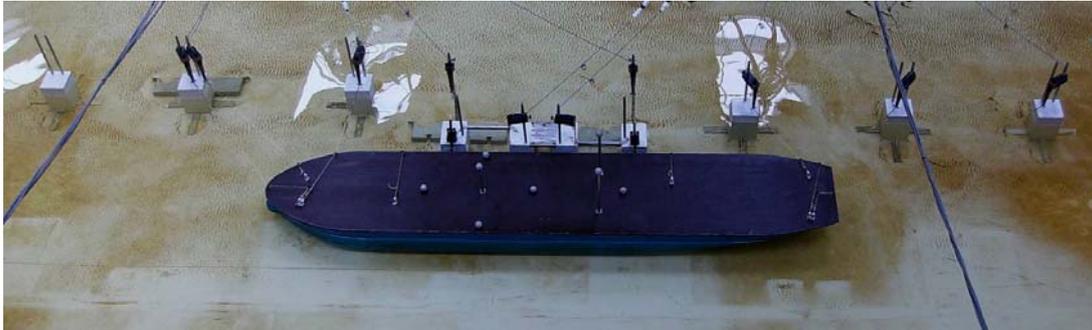


Figura 5 – Navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem e amarração (1^a fase do estudo).

3.4 Segunda fase do estudo em modelo físico

Na segunda fase do estudo construiu-se no tanque de ondas do LH-FEUP um modelo físico que procura reproduzir com maior rigor as características do protótipo, Figura 6. Este modelo incluiu o quebramar Norte do Porto de Leixões, o molhe Sul, o antigo quebramar Norte (estrutura centenária), e uma extensão significativa da Praia de Matosinhos (ainda que apenas de forma simplificada).



Figura 6 – Porto de Leixões e área envolvente, com delimitação da região reproduzida no modelo físico da 2^a fase do estudo [fonte: *Google Earth*].

No modelo da segunda fase do estudo, apenas os primeiros 150 m de desenvolvimento do quebramar Norte de Leixões foram reproduzidos com rigor. Este trecho da estrutura inclui um

quebramar submerso de pré-rebentação de ondas, que foi construído entre Novembro de 1979 e Janeiro de 1982 com o objectivo de proteger a cabeça do quebramar principal, Figura 7.

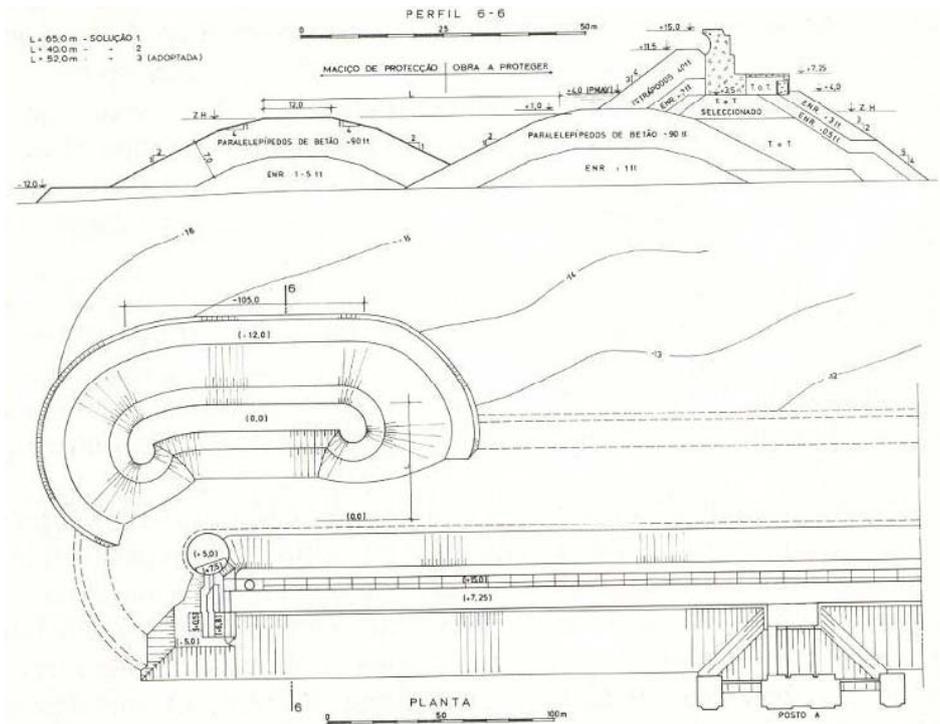


Figura 7 – Cabeça do quebramar Norte do Porto de Leixões (Vera-Cruz e Carvalho, 1993).

Para a reprodução desse trecho foi necessário construir, à escala geométrica 1/100, vários módulos da superestrutura do quebramar Norte e os seguintes tipos de blocos: tetrapodes de 40 t (manto exterior do quebramar Norte); blocos paralelepipedicos com arestas (estrutura do antigo quebramar submerso); blocos paralelepipedicos sem arestas (quebramar submerso construído para proteger a cabeça do quebramar Norte); e os blocos cúbicos de 20 e 40 t usados nas operações de reparação do talude no extremo do quebramar, após o temporal de 1974. A cabeça do quebramar Norte é constituída por vários módulos de geometria complexa, que foram também reproduzidos no modelo físico, Figura 8.



Figura 8 – Quebramar Norte do Porto de Leixões (2^a fase do estudo).

Com este trabalho pretendia-se reproduzir no modelo físico as características reflectivas, de dissipação, e de transmissão (por galgamento), do trecho da obra de protecção que mais influencia o fenómeno da difracção. Neste segundo modelo físico, a agitação marítima gerada, após difracção em torno da cabeça do quebramar Norte, atinge o modelo do navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem.

A grande escala geométrica usada na construção do modelo físico impossibilita que se possam retirar conclusões quantitativas importantes acerca da estabilidade dos blocos usados na materialização da obra de protecção do Posto "A". Também os fenómenos de transmissão, quer através da estrutura, quer por galgamento da mesma, sofrem, à partida, de significativos efeitos de escala, que resultam de não se utilizar uma semelhança completa e da escala utilizada. Ambas as razões contribuíram para a decisão de não se reproduzir com rigor o restante desenvolvimento do quebramar Norte de Leixões (talude exterior desta estrutura).

As condições de agitação marítima na zona do Posto "A" deverão ser também influenciadas pelas características reflectoras da envolvente. Com o objectivo de simular no modelo físico o comportamento de um navio amarrado no Posto "A" em condições próximas das existentes no protótipo, foi necessário reproduzir o talude interior do quebramar Norte, o molhe Sul, o antigo quebramar Norte, a Praia de Matosinhos, e a designada "prainha", localizada entre o quebramar Norte e o antigo quebramar Norte. Por limitações de espaço, apenas uma parte da Praia de Matosinhos pode ser reproduzida no tanque de ondas. De forma a evitar a ocorrência de reflexões indesejadas nas paredes laterais do tanque, a configuração dessa praia foi adaptada. A Figura 9 mostra o esquema de implantação do modelo físico utilizado na segunda fase do estudo no tanque de ondas do LH-FEUP.

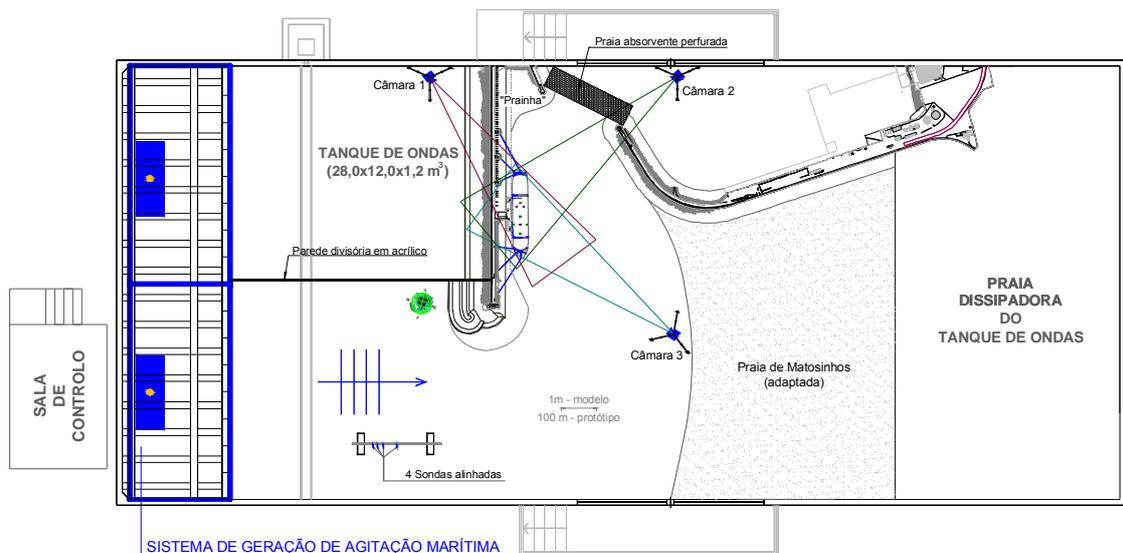


Figura 9 – Esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas: 2^a fase do estudo.

A análise dos registos de operacionalidade do Posto "A" mostra que este posto de acostagem se encontra inoperacional, essencialmente, para condições de agitação marítima com rumos de noroeste e Oeste. No entanto, os pilotos da Barra de Leixões, e os responsáveis pela exploração do Posto "A", afirmaram que, de acordo com a sua experiência, as ondas mais problemáticas para as condições operacionais no Posto "A" são as provenientes do rumo Oeste, quando associadas a períodos superiores a 11 ou 12 s, IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. A agitação proveniente de noroeste não interfere tão significativamente com a operacionalidade do Posto "A", especialmente para alturas de onda inferiores a 2 m, pois "corre" ao longo do paramento exterior do quebramar Norte, diminuindo os episódios de galgamento e penetrando mais dificilmente no interior da bacia associada a esse posto de acostagem. A ondulação de sudoeste, embora no enfiamento da barra, é em geral curta e de pequena altura, não afectando a operacionalidade do Posto "A". Em consonância com o

exposto, na segunda fase do estudo em modelo físico, considerou-se que a agitação marítima tinha uma direcção de propagação perpendicular ao quebramar Norte de Leixões, ou seja, que era proveniente de um rumo próximo do Oeste ($W-20^{\circ}-S$).

As condições de agitação marítima geradas no modelo físico foram medidas e controladas por quatro sondas de níveis hidrodinâmicos, posicionadas segundo um alinhamento colinear com a direcção de propagação da agitação, Figura 9. Estas sondas permitem a determinação da altura de onda significativa incidente e reflectida, em cada teste.

No protótipo, a agitação marítima, depois de contornar a cabeça do quebramar Norte, propaga-se para o interior do Porto de Leixões, onde será parcialmente atenuada. No modelo físico construído, por limitações de espaço, apenas foi possível reproduzir a parte mais exterior do porto, ou seja, a zona compreendida desde a cabeça do quebramar Norte até à entrada no anteporto, Figura 10. Com o objectivo de reproduzir o que se passa no protótipo de forma realista, instalou-se um talude inclinado perfurado no alinhamento definido pela cabeça do antigo quebramar Norte e a cabeça do molhe Sul. Com a instalação desse talude pretende-se potenciar a dissipação da energia da agitação nessa fronteira do modelo físico, de forma a minimizar as reflexões. Os fundos na região adjacente ao quebramar Norte do Porto de Leixões foram considerados horizontais, e à cota de -16 m (ZHL).

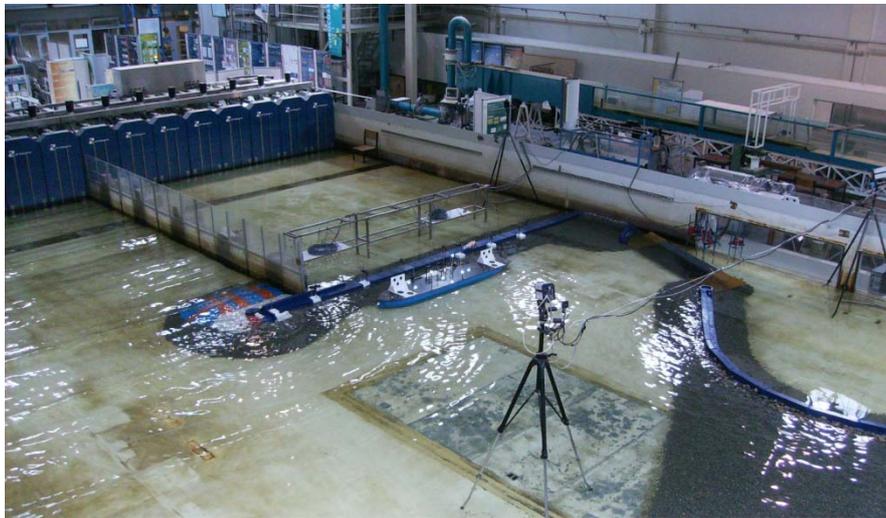


Figura 10 – Modelo físico testado na segunda fase do estudo.

3.5 Equipamentos

O sistema de geração de ondas instalado no tanque de ondas do LH-FEUP é do tipo multi-elementos, e foi desenvolvido pela *HR Wallingford, UK*. Este equipamento tem associado um sistema dinâmico de absorção de reflexões. A elevação da superfície livre da água foi medida com sondas de nível hidrodinâmico.

O sistema *Qualisys – Motion Capture System* foi utilizado para a medição dos movimentos do modelo do navio amarrado, segundo os seis graus de liberdade possíveis (3 movimentos de translação e 3 movimentos de rotação). A Figura 11 esquematiza esses movimentos num sistema de eixos ortogonais OXYZ, centrado no centro de gravidade do navio. Assim, como movimentos do navio no plano horizontal temos o avanço (*surge*), a deriva (*sway*) e a arfagem (*heave*). No plano vertical temos o balanço (*roll*), o cabeceio (*pitch*) e a guinada (*yaw*).

O sistema de medição *Qualisys* é composto por 3 câmaras digitais de infra-vermelhos, e permite efectuar a medição de movimentos sem necessidade de contacto com o modelo do navio, Figura 12. O posicionamento das câmaras relativamente ao modelo físico está esquematizado na Figura 4 (primeira fase) e na Figura 9 (segunda fase).

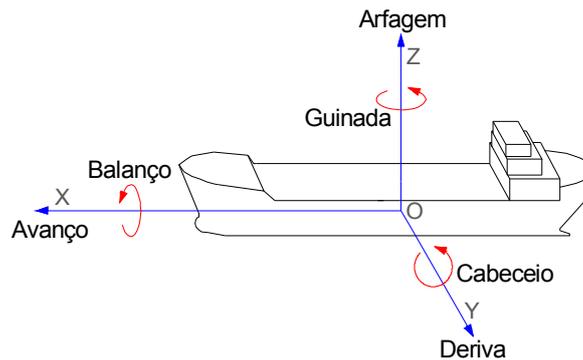


Figura 11 – Movimentos de um navio amarrado.

As forças nos oito cabos de amarração e nas duas defensas foram medidas, de forma contínua, através de um conjunto de 10 transdutores de força, desenvolvidos pela *HR Wallingford, UK*, Figura 12. As séries de registos obtidas são enviadas para uma unidade central, para posterior tratamento e análise. A frequência de aquisição de todos os instrumentos de medição foi fixada em 24 Hz (2,4 Hz no protótipo).



Figura 12 – Navio amarrado à estrutura de acostagem (esquerda); *Qualisys motion capture system*, composto por 3 câmaras de infravermelhos (centro); transdutores de força usados na medição das forças nos cabos de amarração e nas defensas (direita).

3.6 Programa de ensaio

Os testes em modelo físico foram realizados para estados de agitação irregular de crista longa, definidos com base no espectro de JONSWAP, considerando um factor de forma igual a 3,3. Na primeira fase do estudo foram geradas ondas com características semelhantes (equivalentes) às que previsivelmente chegam à zona do Posto “A”, após difracção em torno da cabeça do quebramar Norte do Porto de Leixões, enquanto na segunda fase, as ondas geradas reproduziram condições de agitação semelhantes às que se fazem sentir no exterior do porto. No modelo físico, as ondas geradas propagam-se em direcção ao Posto “A”, contornando a cabeça do quebramar Norte de Leixões por difracção, e sofrendo reflexões nas várias fronteiras do domínio de ensaio.

Com o objectivo de caracterizar convenientemente os estados de mar seleccionados para o estudo, os testes foram realizados com um número mínimo de 600 ondas. A sequência temporal de ondas geradas foi igual nos estados de agitação com o mesmo período de onda de pico. Na segunda fase do estudo, esse número mínimo de ondas foi aumentado para 1200. O Quadro 4 apresenta os parâmetros caracterizadores dos estados de mar gerados nos testes seleccionados para esta comunicação, em que H_S representa a altura de onda significativa, e T_P o período de onda de pico.



Quadro 4 – Condições de agitação marítima (valores de protótipo).

T_P (s) \ H_S (m)	1ª Fase		2ª Fase
	1,5	2,0	3,0
10	X	X	X
12	X	X	X
14	X	X	X
16	X	X	X
18	X	X	X
20			X

Na primeira fase do estudo, os testes foram realizados com uma profundidade de água junto ao cais igual a 18 m (protótipo), que corresponde sensivelmente ao nível médio do mar, enquanto nos testes referentes à segunda fase se considerou uma profundidade de 20 m (protótipo), que corresponde sensivelmente ao nível máximo de uma preia-mar de águas vivas.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Nota introdutória

As intervenções no sistema de amarração estudadas no âmbito deste trabalho incluíram, quer a modificação da superfície de contacto da defesa com o casco do navio, quer a alteração da condição de pré-tensão nos cabos de amarração. Esta secção visa o estabelecimento de uma metodologia para a avaliação da influência dessas intervenções no comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões e, simultaneamente, a sua fundamentação.

As Figuras 13 e 14 comparam as amplitudes dos vários movimentos do navio amarrado (valores pico-a-pico), para diferentes combinações de defensas (i.e. coeficientes de atrito na interface do casco do navio com a defesa) com condições de pré-tensão nos cabos de amarração.

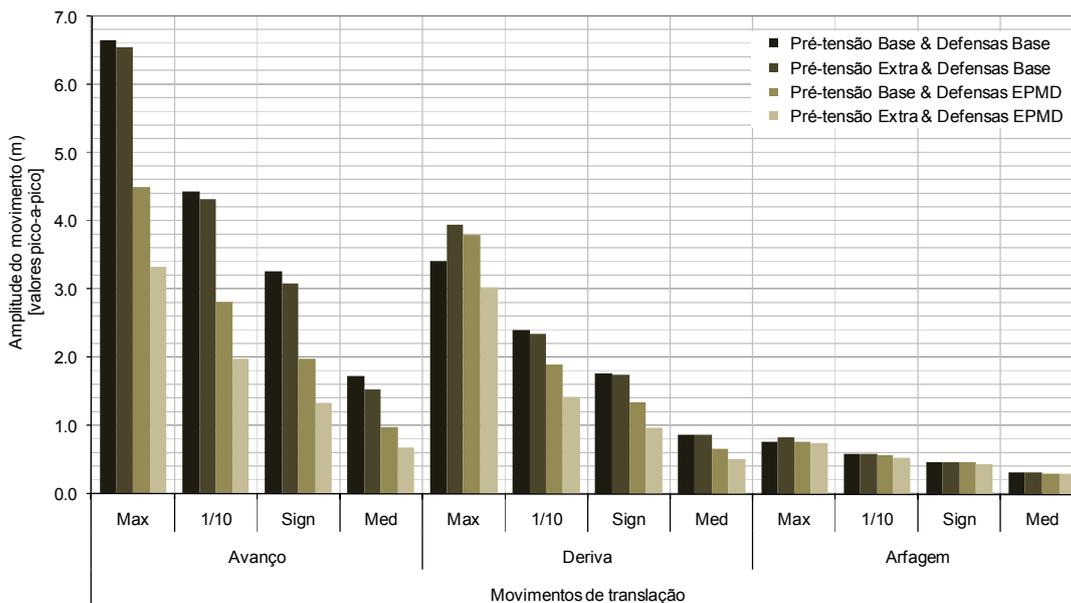


Figura 13 – Amplitudes dos movimentos do navio amarrado no plano horizontal (valores no protótipo), para diferentes combinações de defensas com condições de pré-tensão nos cabos de amarração.

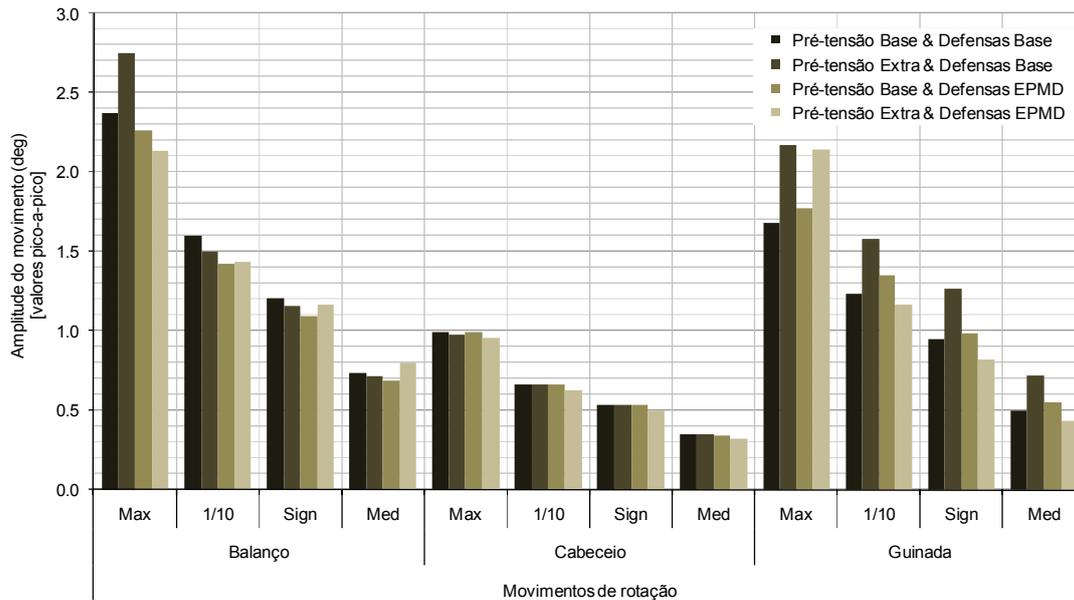


Figura 14 – Amplitudes dos movimentos do navio amarrado no plano vertical (valores no protótipo), para diferentes combinações de defensas com condições de pré-tensão nos cabos de amarração.

Os resultados apresentados referem-se a testes realizados na primeira fase do estudo com estados de agitação irregular, caracterizados por uma altura de onda significativa, H_s , de 2,0 m e um período de onda de pico, T_p , de 14 s, para uma profundidade da água junto ao cais igual a 18 m (protótipo). Para cada um dos movimentos são apresentadas as amplitudes máximas (*Max*), médias do décimo superior (*1/10*), significativas (*Sign*) e médias (*Med*). A contagem das oscilações do navio foi realizada com base na técnica dos zeros descendentes, tomando como referência a posição de repouso do navio amarrado.

Verifica-se que as modificações introduzidas no sistema de amarração têm repercussões, essencialmente, nos modos de oscilação do navio no plano horizontal, i.e., nos movimentos de avanço, deriva e guinada. Os modos de oscilação no plano vertical são menos sensíveis à alteração das características do sistema de amarração, especialmente os modos de arfagem e de cabeceio.

De um modo geral, do aumento do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas e das forças de pré-tensão aplicadas nos traveses, resulta uma redução da amplitude dos vários movimentos do navio amarrado, qualquer que seja a categoria de movimento considerada. No entanto, os resultados apresentados nas Figuras 14 e 15 (que servem de exemplo) mostram algumas exceções, essencialmente, segundo os modos de balanço e de guinada.

A amplitude máxima da oscilação refere-se, por definição, à máxima oscilação pico-a-pico registada, segundo um determinado modo de oscilação do navio, durante a duração do teste. Trata-se, portanto, de um parâmetro extremo, que se poderá relacionar com as condições-limite de segurança de um navio amarrado. Em condições normais de utilização, a atenção estará centrada, essencialmente, na eficiência e na segurança das operações de carga e descarga do navio. Nestes casos, poderá justificar-se a adopção de um parâmetro mais representativo das oscilações do navio amarrado, no qual a importância de oscilações individuais (extremas) se possa diluir na média da amplitude das oscilações acima de uma determinada oscilação de referência.

Um parâmetro do tipo referido poderá também ser o mais adequado nas situações em que se pretende fazer uma análise comparativa da eficácia de diferentes intervenções no sistema de amarração, como é o caso da presente comunicação. Assim, a análise da influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas no comportamento de um navio amarrado, para duas condições de pré-tensão, é efectuada tendo por base a amplitude



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

significativa das oscilações do navio amarrado (definida como a média do terço superior das amplitudes pico-a-pico dos movimentos do navio).

Importa ainda referir que a análise das séries temporais dos movimentos do navio amarrado mostrou que, em algumas situações, o parâmetro amplitude máxima da oscilação dependia significativamente da metodologia de contagem de oscilações utilizada, i.e., se se tratava da técnica dos zeros ascendentes ou descendentes. Esta constatação contribuiu também para a escolha efectuada.

Nesta comunicação dá-se especial atenção aos movimentos que, de acordo com Bruun, 1983, citado por Rita, 1995, são mais importantes para a segurança e para a eficiência das operações portuárias que têm lugar num terminal de petroleiros. Esses movimentos são o avanço, a deriva e a guinada, i.e., os movimentos do petroleiro no plano horizontal. Deste conjunto, a guinada será, provavelmente, o menos condicionante, uma vez que os braços de (des)carga estão instalados na zona central do Posto "A" e, usualmente, as válvulas de (des)carga do navio situam-se, sensivelmente, a meio-navio.

4.2 *Primeira fase do estudo em modelo físico*

Nesta secção analisa-se a influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas, e do aumento da força de pré-tensão nos traveses, no comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões, com base em resultados da primeira fase do estudo em modelo físico. A Figura 15 compara a redução da amplitude significativa dos movimentos do navio, no plano horizontal, de três combinações de coeficientes de atrito com forças de pré-tensão nos cabos de amarração, em relação a uma condição de referência. Nessa condição, as forças iniciais nos cabos de amarração são as correspondentes à condição de pré-tensão base, e simulam-se defensas com um baixo coeficiente de atrito na interface com o casco do navio. Os resultados são apresentados em função do período de pico da agitação marítima, e para duas alturas de onda significativas.

Uma análise global dos resultados apresentados permite constatar que a combinação de defensas com um coeficiente de atrito elevado com um aumento das forças de pré-tensão nos traveses, é a que conduz a reduções mais expressivas das amplitudes significativas dos movimentos do navio no plano horizontal. Por outro lado, um aumento da pré-tensão nos traveses, em conjunto com defensas de baixo coeficiente de atrito, conduz a resultados mais modestos. Nas condições em que o estudo foi efectuado, a simples substituição das defensas base por defensas de elevado coeficiente de atrito revelou-se mais eficaz, na redução da amplitude significativa dos movimentos do navio, do que o aumento das forças de pré-tensão nos traveses, com defensas de baixo atrito instaladas no cais. Tendo em conta o referido, o aumento da pré-tensão nos traveses conduz a melhores resultados quando as defensas instaladas no cais apresentam um coeficiente de atrito elevado na interface com o navio.

Nesse aspecto, e pondo de parte questões relacionadas com a reflectividade, as defensas pneumáticas instaladas no Posto "A", ao proporcionam um coeficiente de atrito muito elevado na interface com o casco do navio, são uma solução adequada quando se pretende minimizar os movimentos do navio amarrado (especialmente o avanço). Adicionalmente, melhorarão a eficácia de um hipotético aumento da pré-tensão nos cabos de amarração do navio. Outras soluções comerciais (e.g. defensas do tipo cónico), com um comportamento comprovadamente menos reflectivo, podem apresentar como inconveniente a necessidade da sua utilização em associação com painéis frontais de baixo atrito, destinados a minimizar os esforços de corte nestes elementos.

Dos movimentos do navio no plano horizontal, o avanço é aquele cuja amplitude é mais fortemente reduzida com as alterações operadas no sistema de amarração (em relação à condição de referência). Quando se recorre à utilização de defensas de elevado coeficiente de atrito, em combinação com um aumento das forças de pré-tensão nos traveses, a redução da amplitude significativa dessa oscilação situa-se, grosso modo, entre 50 e 75%, com a maior redução a ocorrer para os períodos de onda de pico mais baixos.

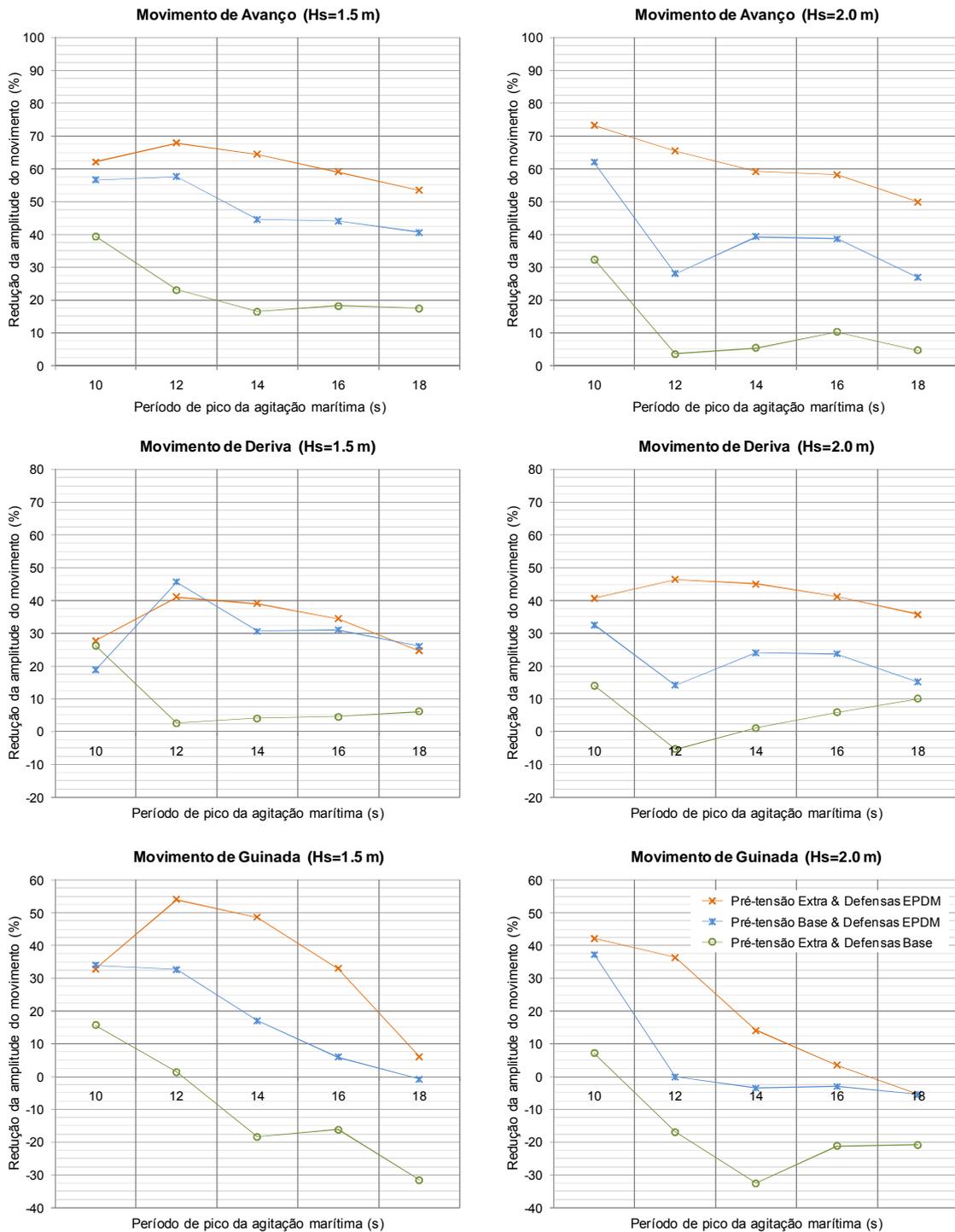


Figura 15 – Redução da amplitude significativa dos movimentos do navio no plano horizontal, para diferentes intervenções no sistema de amarração, e em relação a uma condição de referência.

De um modo geral verifica-se uma tendência de decréscimo da redução da amplitude da oscilação com o aumento do período de onda de pico, qualquer que seja o modo de oscilação e a modificação introduzida no sistema de amarração. No entanto, observam-se algumas exceções a esta tendência geral para o período de 10 s, mais evidentes nos modos de deriva e de guinada, nos testes realizados para uma altura de onda significativa igual a 1.5 m. Estes resultados deverão estar relacionados com as pequenas amplitudes dos movimentos



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

experimentados pelo navio amarrado para as condições de teste referidas, que diminuem a margem para a sua redução, Quadro 5.

Quadro 5 – Amplitudes significativas dos movimentos de deriva e de guinada, para diferentes características do sistema de amarração. Testes com $H_s = 1.5$ m (valores de protótipo).

T_p (s)	Deriva		Guinada	
	10	12	10	12
Referência	0.322	0.632	0.234	0.442
PT-E & DF-B	0.237	0.616	0.197	0.436
PT-N & DF-EPDM	0.261	0.343	0.154	0.298
PT-E & DF-EPDM	0.232	0.373	0.157	0.203

PT-E – Condição pré-tensão Extra;
PT-N – Condição pré-tensão Normal;
DF-B – Defensas base, i.e., com recobrimento em polietileno;
DF-EPDM – Defensas com recobrimento em EPDM.

Outra constatação interessante reside no facto de a redução da amplitude significativa dos movimentos de avanço e de deriva, para a condição de pré-tensão extra e defensas de baixo atrito, diminuir acentuadamente na transição do período de 10 para 12 s. A partir dos 12 s, verifica-se uma tendência para uma variação da redução da amplitude do movimento mais suave com o aumento período de onda de pico. Este comportamento parece indicar que, a partir do momento em que as forças de atrito desenvolvidas na interface do navio com as defensas são vencidas, a contribuição do aumento das forças de pré-tensão nos traveses para a redução dos movimentos do navio amarrado se reduz consideravelmente.

Para a oscilação de guinada, os efeitos positivos associados, quer à utilização de defensas com um coeficiente de atrito elevado, quer ao aumento da pretensão nos traveses, tendem a diminuir mais rapidamente com o aumento do período de pico da agitação marítima. Na situação mais extrema, condição de pré-tensão base e defensas de baixo atrito, para períodos de onda superiores a 10 s, verifica-se um agravamento dessas oscilações que pode ultrapassar os 30%. Estes resultados verificam-se, quer para alturas de onda significativas de 1,5 m, quer de 2,0 m. Quando se utilizam defensas de atrito elevado, continua a ocorrer uma expressiva diminuição da redução da amplitude significativa da guinada em relação à condição de referência. No entanto, no pior dos casos, o agravamento dessa oscilação é inferior a 5%.

O agravamento das oscilações do navio, por efeito das intervenções realizadas no sistema de amarração, não ocorre apenas para o modo de guinada. No entanto, e tal como se referiu anteriormente, esta comunicação centra-se, exclusivamente, na análise das repercussões dessas intervenções nos movimentos do navio plano horizontal.

4.3 Segunda fase do estudo em modelo físico

Os resultados da segunda fase do estudo em modelo físico são apresentados na Figura 16. Esta figura compara as reduções da amplitude significativa dos movimentos do navio (no plano horizontal) de três combinações de coeficientes de atrito com forças de pré-tensão nos cabos de amarração, em relação a uma condição de referência. Tal como na primeira fase, nessa condição, as forças iniciais nos cabos de amarração são as correspondentes à condição de pré-tensão base, e simulam-se defensas com um baixo coeficiente de atrito na interface com o casco do navio. Os resultados são apresentados em função do período de pico da agitação marítima, e para uma altura de onda significativa de 3.0 m (no exterior do porto).

Uma análise global dos resultados obtidos com o segundo modelo físico (mais próximo da realidade física) permitir tecer algumas das considerações já apresentadas aquando da análise dos resultados da primeira fase do estudo. De facto, a utilização de defensas com um

coeficiente de atrito elevado, em combinação com um aumento das forças de pré-tensão nos traveses, conduz a importantes reduções das amplitudes significativas dos movimentos do navio no plano horizontal. Segundo o movimento de avanço, essa redução situa-se, grosso modo, entre 55 e 75%, e diminui com o aumento do período de onda de pico. Para o movimento de deriva, a redução é menos significativa, podendo, no entanto, atingir 45% para os períodos de onda mais elevados. Segundo o modo de guinada, os resultados obtidos são modestos, com a redução da amplitude dessa oscilação a situar-se sempre abaixo dos 30%.

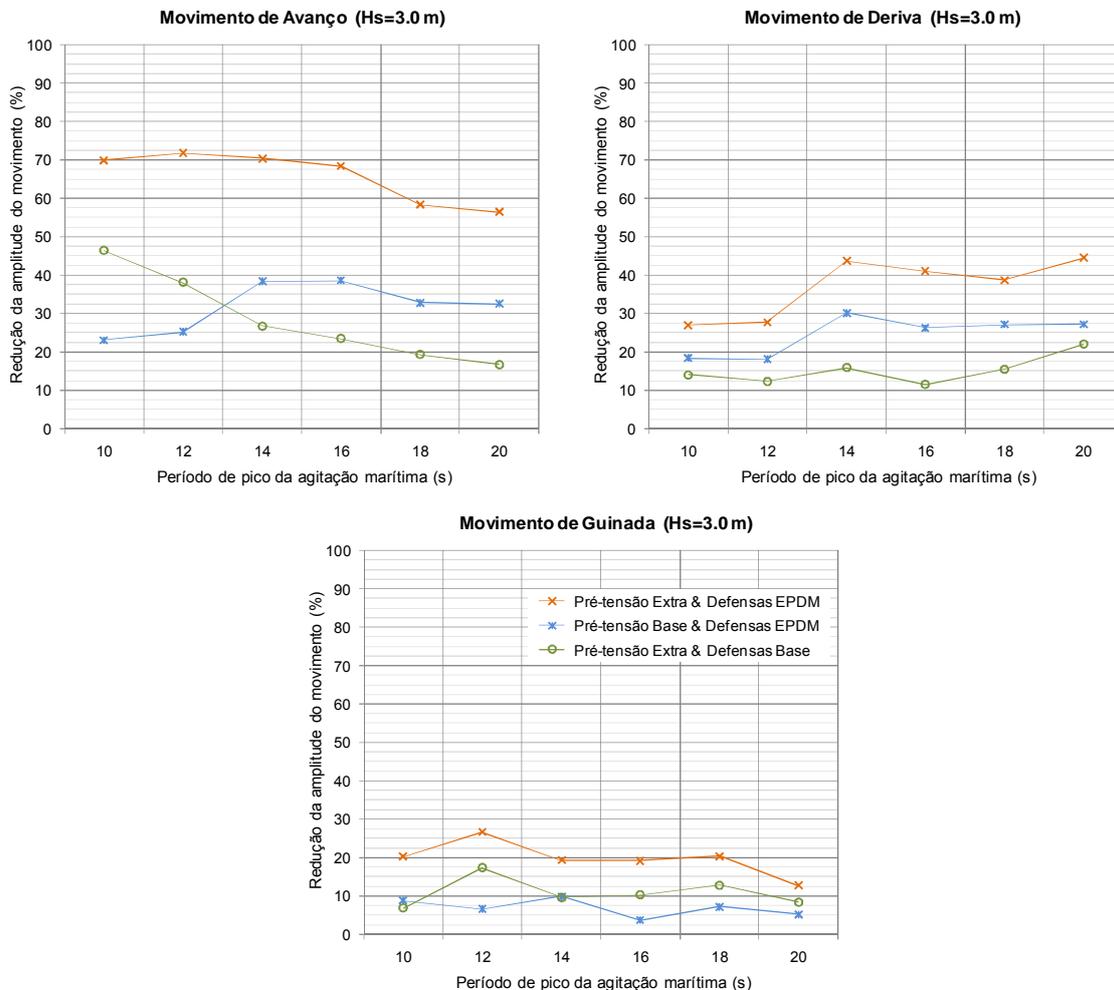


Figura 16 – Redução da amplitude significativa dos movimentos do navio no plano horizontal, para diferentes intervenções no sistema de amarração, e em relação a uma condição de referência.

No entanto, uma análise mais pormenorizada dos resultados apresentados na Figura 16 permite constatar algumas diferenças relativamente à primeira fase do estudo em modelo físico. Segundo o modo de avanço, e para períodos de onda de pico até 12 s, observam-se melhores resultados com a condição de pré-tensão extra e defensas base, que com a condição de pré-tensão base e defensas em EPDM. A partir desse período de onda, a situação inverte-se, e os resultados passam a estar em consonância com os da primeira fase do estudo. Para o modo de deriva, observa-se uma tendência generalizada para os resultados das intervenções no sistema de amarração melhorarem com o aumento do período de pico da agitação.

Apesar de as duas fases do estudo terem sido realizadas com o modelo físico do navio amarrado à estrutura de acostagem com sistemas de amarração de características idênticas, e calibrado para a mesma condição de carga, as características da agitação na zona do Posto “A” alteraram-se substancialmente. Enquanto na primeira fase o modelo foi testado sob a



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

acção de ondas de crista longa de vante (i.e. com uma direcção de propagação colinear com o eixo longitudinal central do navio), na segunda fase, as características da agitação na zona do cais são o resultado da difracção da agitação em torno da cabeça do quebramar Norte de Leixões, e de reflexões no talude exterior do molhe Sul, na praia de Matosinhos, e noutras fronteiras do domínio ensaiado.

Tendo por base o referido, e uma vez que não existe nenhuma acção externa importante a actuar na direcção transversal, poderá admitir-se que uma parcela significativa da oscilação de deriva do navio registada na primeira fase do estudo seja o resultado da assimetria do *layout* de amarração. Ou seja, face a movimentos longitudinais de grande amplitude, quando o navio se desloca no sentido da popa (sentido negativo do movimento de avanço), verifica-se que os lançantes de proa e a regeira da popa tendem a puxar o navio contra as defensas, por acção da componente transversal das forças aplicadas nestes cabos de amarração. A reacção elástica das defensas tende a afastar o navio do cais, dando origem a oscilações de deriva e, eventualmente, de guinada, ambas de amplitude considerável. Quando o navio se desloca no sentido da proa verifica-se o mesmo fenómeno, mas desta vez com os lançantes de popa e a regeira de proa a puxarem o navio contra as defensas. Nesta descrição simplista do comportamento do navio amarrado, torna-se claro que o atrito nas defensas assume um papel de destaque, uma vez que o navio está em contacto com as defensas, durante uma parte substancial do tempo. Como se referiu, na movimentação do navio, os próprios cabos de amarração puxam o navio contra as defensas.

Nas condições testadas na segunda fase do estudo, o comportamento do navio amarrado poderá diferir do descrito no parágrafo anterior. Como já se referiu, nesse modelo físico, as condições de agitação na zona de implantação do Posto "A" são substancialmente diferentes das ensaiadas na primeira fase do estudo. As reflexões nas fronteiras do domínio de ensaio, bem como a proximidade do cais a uma fronteira reflectora (intradorso do quebramar Norte de Leixões), podem dar origem a importantes acções externas, que actuarão no modelo do navio segundo uma direcção que é aproximadamente perpendicular ao seu eixo longitudinal central. Isto significa que o navio amarrado poderá experimentar importantes oscilações de deriva sem que estas estejam, necessariamente, associadas a oscilações de avanço de elevada amplitude.

Essas oscilações de deriva originam o afastamento transversal do navio em relação ao cais, reduzindo as forças aplicadas nas defensas. Para oscilações de elevada amplitude, o navio poderá perder, momentaneamente, o contacto com as defensas. Nessas condições, as forças de atrito na interface do navio com as defensas diminuem, ou deixam de existir. Com esta importante força de oposição ao movimento de avanço reduzida, ou mesmo suprimida, o navio amarrado fica mais susceptível de experimentar movimentos nessa direcção. Assim se explica que para períodos de onda de pico baixos, e contrariamente ao observado nos resultados da primeira fase do estudo, o aumento das forças de pré-tensão nos traveses (que favorecem o contacto do navio com as defensas) conduza a melhores resultados que a utilização de defensas com um coeficiente de atrito elevado.

Os resultados apresentados no Quadro 6 corroboram as explicações dadas nos parágrafos anteriores. De facto, na segunda fase do estudo, para movimentos de avanço da mesma ordem de grandeza dos verificados na primeira fase, os quocientes deriva-avanço são mais elevados. Para a condição de pré-tensão extra e defensas em EPDM, esses quocientes podem mesmo ser superiores a 100%, o que significa que a amplitude da oscilação de deriva é superior à amplitude da oscilação de avanço. Importa também referir que uma das causas que está na origem dos elevados quocientes deriva-avanço, nas duas fases do estudo, é a elevada reflectividade das defensas instaladas na estrutura de acostagem.

De um modo geral, a substituição das defensas base por defensas de atrito elevado mostrou-se mais eficaz, na redução da amplitude dos movimentos do navio, que o aumento das forças de pré-tensão nos traveses, com defensas de baixo atrito instaladas no cais. As diferenças mais significativas ocorreram segundo o modo de oscilação de deriva.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Quadro 6 – Amplitude significativa da oscilação de avanço, $A_{\text{avanço}}$, e quociente deriva-avanço, Quo, para diferentes combinações de defensas e forças de pré-tensão nos cabos de amarração.

Fase do estudo	T_p (s)	Referência		PT-E & DF-B		PT-N & DF-EPDM		PT-E & DF-EPDM	
		$A_{\text{avanço}}$ (m)	Quo (%)						
1 ^a Fase (Hs=1.5m)	10	0.642	50	0.389	61	0.279	94	0.243	96
	12	1.301	49	1.001	62	0.552	62	0.418	89
	14	1.640	52	1.369	60	0.909	65	0.583	90
	16	1.727	53	1.412	62	0.966	65	0.707	85
	18	2.312	46	1.909	52	1.371	57	1.076	74
1 ^a Fase (Hs=2.0m)	10	1.619	35	1.096	45	0.615	62	0.434	78
	12	2.488	47	2.398	51	1.790	56	0.859	73
	14	3.260	54	3.083	57	1.977	68	1.329	73
	16	3.852	48	3.454	50	2.362	60	1.608	68
	18	4.681	45	4.462	42	3.421	52	2.342	58
2 ^a Fase (Hs=3.0m)	10	0.795	62	0.426	100	0.612	66	0.239	152
	12	1.382	55	0.856	77	1.035	60	0.389	140
	14	2.192	56	1.607	64	1.350	64	0.648	107
	16	3.160	51	2.419	59	1.940	61	1.001	95
	18	3.485	65	2.810	68	2.340	70	1.451	95
	20	4.057	69	3.375	64	2.740	74	1.767	88

5 CONCLUSÕES

Nesta comunicação analisou-se a influência do coeficiente de atrito na interface do casco do navio com as defensas, no comportamento de um navio petroleiro amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões, para duas condições de pré-tensão nos cabos de amarração. O trabalho desenvolvido baseou-se nos resultados obtidos com dois modelos físicos, construídos à escala geométrica 1/100. A eficácia de cada uma das intervenções no sistema de amarração foi avaliada por comparação com uma condição de referência, na qual as forças iniciais nos cabos de amarração são as correspondentes à condição de pré-tensão base, e as defensas instaladas no cais apresentavam um coeficiente de atrito baixo na interface com o casco do navio.

De um modo geral, os resultados obtidos nas duas fases do estudo em modelo físico estão em sintonia, e mostram que a utilização de defensas com um coeficiente de atrito elevado, em combinação com um aumento das forças de pré-tensão nos traveses, permite obter reduções expressivas das amplitudes significativas dos movimentos do navio no plano horizontal (em relação à condição de referência). Dos movimentos analisados, o avanço é aquele cuja amplitude é mais fortemente reduzida com as alterações operadas no sistema de amarração. Nas duas fases do estudo, a redução da oscilação de avanço situou-se, grosso modo, entre 75 e 50%, diminuindo com o aumento do período de onda de pico. Para o movimento de deriva, as reduções são menos significativas. Segundo o modo de guinada, os resultados obtidos são ainda mais modestos, com a redução da amplitude dessa oscilação a situar-se sempre abaixo dos 30%.

Nas condições em que o estudo foi efectuado, a simples substituição das defensas base por defensas de elevado coeficiente de atrito revelou-se mais eficaz, na redução da amplitude significativa dos movimentos do navio, do que o aumento das forças de pré-tensão nos traveses, com defensas de baixo atrito instaladas no cais. Adicionalmente, o aumento da pré-tensão nos traveses conduz a melhores resultados quando as defensas instaladas no cais apresentam um coeficiente de atrito elevado na interface com o casco do navio.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Assim, e pondo de parte questões relacionadas com a reflectividade, as defensas pneumáticas instaladas no Posto "A", ao proporcionam um coeficiente de atrito elevado na interface com o casco do navio, são uma solução adequada quando se pretende minimizar os movimentos do navio amarrado (especialmente o avanço). Adicionalmente, melhorarão a eficácia de um hipotético aumento da pré-tensão nos cabos de amarração do navio. Outras soluções comerciais (e.g. defensas do tipo cónico), com um comportamento comprovadamente menos reflectivo, podem apresentar como inconveniente a necessidade da sua utilização em associação com painéis frontais de baixo atrito, destinados a minimizar os esforços de corte nestes elementos.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado nesta comunicação foi realizado no âmbito do projecto de investigação DOLPHIN (PTDC/ECM/72835/2006), que é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia com fundos do programa POCI/FEDER.

REFERÊNCIAS

Bruun, P., 1983. *Mooring and fendering rational principles in design*. 8th International Haven Congress, June.

IHRH-FEUP, 2004. Estudo realizado para a Administração dos Portos do Douro e Leixões, sobre as condições de operacionalidade no Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões: Modelação numérica da agitação na envolvente do Porto de Leixões. Porto, Portugal, 31p.

IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. Estudo realizado para a Administração dos Portos do Douro e Leixões, sobre as condições de operacionalidade no Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões (6 Volumes): Relatório de Síntese. Porto, Portugal, 76p.

Rita, M., 1995. *Dimensionamento Hidráulico de Portos - Operacionalidade e Segurança de Navios nos Cais*. Teses e Programas de Investigação LNEC, LNEC, Lisboa, 1995. ISBN 972-49-1680-4.

Rosa Santos, P.; Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F. & Brogueira Dias, E., 2007. *Estudo do Comportamento de um Navio Amarrado no Posto "A" do Terminal Petroleiro do Porto de Leixões: Construção e Calibração do Modelo Físico*. 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 24 de Out. de 2007, ISBN 978-989-95557-1-6.

Veloso Gomes, F.; Taveira Pinto, F.; Rosa-Santos, P.; Brogueira-Dias, E. & Guedes Lopes, H., 2005. *Berthing characteristics and behavior of the oil terminal of Leixões Harbour, Portugal*. Marine Heritage and Modern Ports, WIT Press, ISBN: 1-84564-010-1.

Vera-Cruz, D. & Carvalho, J., 1993. *Maciço submerso de pré-rebentação das ondas como meio de protecção de obras marítimas. O caso do Quebramar de Leixões*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº796, Lisboa, ISBN: 972-49-1587-5.