



ANÁLISE PRELIMINAR DOS EFEITOS DA ALTERAÇÃO DA CABEÇA DO QUEBRAMAR NORTE DE LEIXÕES NO COMPORTAMENTO DE UM NAVIO AMARRADO NO POSTO “A”

Paulo Rosa Santos⁽¹⁾, *Fernando Veloso Gomes*⁽¹⁾, *Francisco Taveira Pinto*⁽¹⁾,
Emílio Brògueira Dias⁽²⁾

⁽¹⁾ 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

⁽²⁾ Administração dos Portos do Douro e Leixões, SA
Av. da Liberdade, 4450-718, Leça da Palmeira, Portugal
brogueira.dias@apdl.pt

RESUMO

As condições operacionais dos terminais portuários construídos no intradorso de quebramares exteriores são influenciadas pela agitação marítima que, por difracção, contorna essas obras de abrigo. O artigo apresenta uma análise comparativa preliminar de duas possíveis intervenções na cabeça do quebramar norte de Leixões, que procuram melhorar as condições operacionais e de segurança de um posto de acostagem próximo. As intervenções estudadas em modelo físico consistem no prolongamento de um muro-cortina, na direcção perpendicular ao alinhamento do quebramar norte, e na construção de um “maciço” com uma forma aproximadamente circular (em planta), utilizando blocos de betão dispostos de uma forma irregular. As duas intervenções têm um efeito positivo no comportamento do navio, pois permitem a redução da amplitude dos seus movimentos. No entanto, a construção do maciço circular mostrou-se mais eficaz do que o prolongamento do muro-cortina. A redução da amplitude significativa dos movimentos do navio não ultrapassa, em geral, os 25%. A eventual optimização dessas intervenções poderá contribuir para o aumento da sua eficácia.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos navios amarrados em cais construídos na proximidade de quebramares exteriores é influenciado, em maior ou menor grau, pela agitação marítima que, pelo fenómeno da difracção, contorna essas obras de abrigo portuário. A alteração da configuração da cabeça do quebramar tem repercussões nas condições de tranquilidade na zona de sombra que lhe está associada e, por conseguinte, nas condições operacionais dos cais adjacentes.

O Porto de Leixões está situado na foz do rio Leça, cerca de 4.5 km a norte da embocadura do rio Douro. Dois quebramares proporcionam condições de abrigo a este porto, que é a segunda maior infra-estrutura portuária do país em termos de carga movimentada.

O Terminal de Petroleiros de Leixões é constituído por três postos de acostagem, Figura 1. O Posto “A”, implantado no intradorso do quebramar norte, é o que se encontra mais exposto às condições do ambiente marítimo, apresentando, por vezes, problemas de operacionalidade. Nas situações mais críticas, os navios aí amarrados apresentam movimentos de grande amplitude, que podem resultar na rotura de alguns cabos de amarração, IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005. Actualmente, as condições são melhores. No entanto, a melhoria da operacionalidade do Posto “A” continua a ser um objectivo estratégico da autoridade portuária.

Este artigo apresenta uma análise comparativa preliminar, em modelo físico, de duas hipóteses de intervenção na cabeça do quebramar norte de Leixões, que visam a melhoria das condições operacionais e de segurança do Posto “A”. Essas intervenções consistem: no prolongamento de um muro-cortina, segundo a direcção perpendicular ao quebramar norte; e na construção de um “maciço”, com uma forma em planta aproximadamente circular, utilizando blocos de betão.



Figura 1 – Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões.

Os resultados experimentais que suportam o estudo efectuado foram 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 em portos.

2 POSTO “A” DO TERMINAL DE PETROLEIROS DE LEIXÕES

O Terminal de Petroleiros de Leixões é constituído por três postos de acostagem. O Posto “A”, devido à sua localização, Figura 1, e apesar da protecção oferecida pelo quebramar norte, é dos três postos de acostagem que constituem esse terminal, aquele que se encontra mais exposto às condições do ambiente marítimo, que é particularmente energético. Por esse motivo, o Posto “A” apresenta alguns problemas operacionais. Nas situações mais críticas, os navios amarrados apresentam movimentos de grande amplitude (que podem conduzir à rotura de alguns cabos de amarração), e as operações de carga e descarga tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis de realizar em segurança. Por vezes, o petroleiro é obrigado a abandonar o cais e a esperar por melhores condições para prosseguir as operações de movimentação de graneis líquidos. IHRH-FEUP/CEHIDRO-IST, 2005, apresenta uma descrição detalhada das condições operacionais do Posto “A”.

O Posto “A” é utilizado por uma gama variada de navios. Os navios de maior porte apresentam um comprimento de 250 m, um calado máximo de 14 m, e um deslocamento máximo de cerca de 120 000 t. Na bacia de manobra associada ao Posto “A” os fundos de serviço são mantidos, sensivelmente, à cota -16 m ZHL. A Figura 2 apresenta a secção transversal do quebramar norte de Leixões adjacente ao Posto “A”

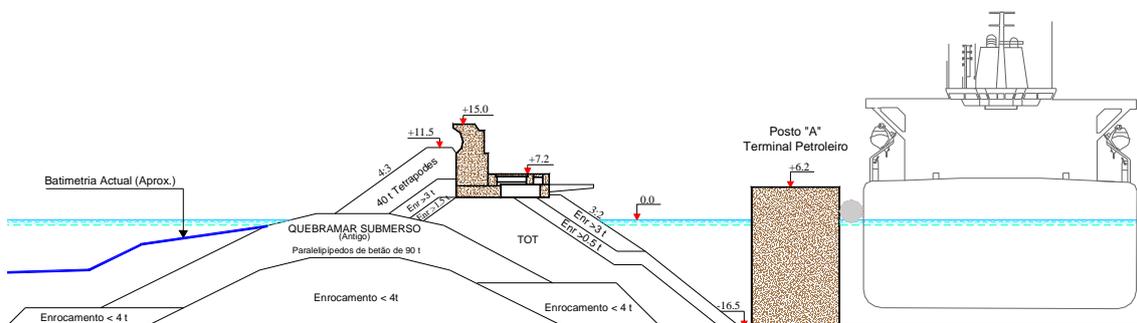


Figura 2 – Secção transversal do quebramar norte de Leixões adjacente ao Posto “A”.

A estrutura de acostagem é constituída por duques d’Alba de acostagem e de amarração, e por uma plataforma. Os duques d’Alba estão dotados de defensas flutuantes do tipo pneumático e ganchos de amarração duplos. Os navios são usualmente amarrados com 16 cabos (dois cabos

em cada direcção). A Figura 3 apresenta o *layout* mais frequentemente utilizado pelos navios de maior porte no Posto “A” (cabos a azul), que é ligeiramente assimétrico. É ainda apresentado um *layout* alternativo, que tira partido dos ganchos localizados na extremidade do quebramar norte para a amarração dos lançantes de proa – CA8. Este *layout* é aproximadamente simétrico.

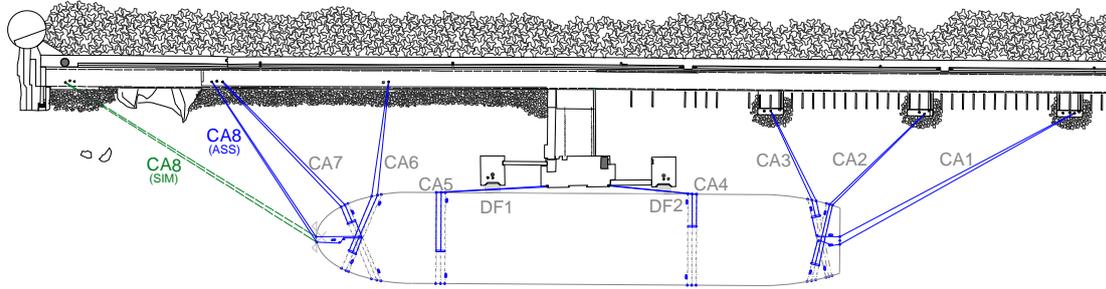


Figura 3 – *Layouts* de amarração do navio. Identificação dos cabos de amarração e das defensas.

As características dos cabos de amarração utilizados pelos navios no Posto “A” variam, mas é frequente a utilização de cabos de aço com extremidades de fibras sintéticas (e.g. poliamida). As defensas instaladas 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.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Área portuária e instalação do modelo físico

O estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente 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.

A Figura 4 apresenta a área portuária que foi objecto de estudo. O modelo construído pretendeu assim reproduzir os seguintes elementos do protótipo: o quebramar norte, o antigo quebramar norte (estrutura centenária), a “Prainha” situada entre essas estruturas, o molhe sul, a Praia de Matosinhos (ainda que de uma forma simplificada), a estrutura de acostagem, as características elásticas dos cabos de amarração e das defensas e, naturalmente, as características estáticas e dinâmicas do navio petrolífero seleccionado para o estudo.



Figura 4 – Porto de Leixões e área envolvente, com delimitação da área reproduzida no estudo experimental (*Google Earth, 2007*).

A profundidade de água foi considerada uniforme (fundos à cota -16 m ZHL), excepto na zona das praias. O modelo físico foi construído de acordo com os critérios de semelhança de *Froude* e de *Cauchy*, para uma escala geométrica não distorcida igual a 1/100.

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°-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°-S permite ainda minimizar os problemas associados à reflexão das ondas nas paredes laterais do tanque de ondas (efeito de laboratório), Figura 5.

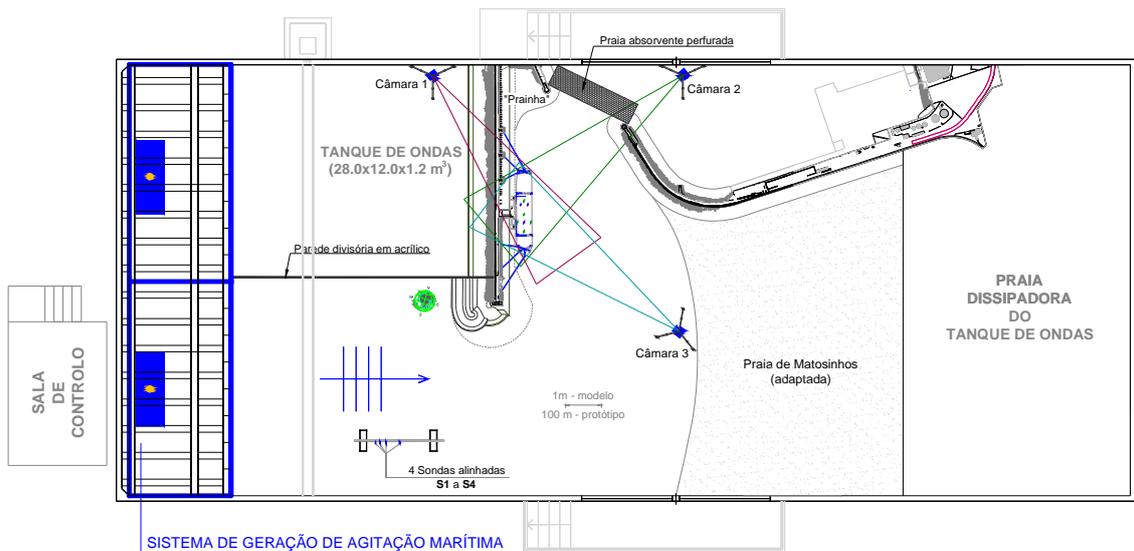


Figura 5 – Implantação do modelo físico no tanque de ondas.

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, Figura 6.



Figura 6 – Construção da cabeça do quebramar norte – a barlar (esquerda); intradorso do quebramar norte e Posto “A” (direita).

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. As várias medidas tomadas para minimizar os efeitos laboratoriais no interior da instalação experimental são apresentadas em Rosa-Santos, 2010. No modelo, as condições de agitação na área adjacente ao Posto “A” eram o resultado, sobretudo, 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 7.

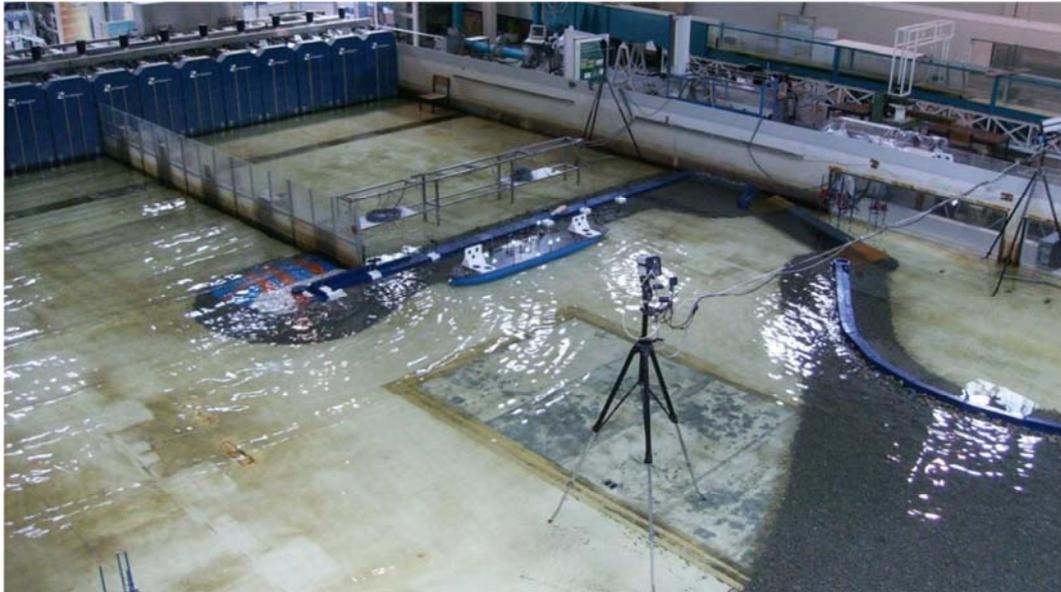


Figura 7 – Modelo físico testado.

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 5. A frequência de aquisição dos vários equipamentos de medição foi fixada em 24 Hz (*i.e.*, 2.4 Hz no protótipo). É corrente considerar válidos, apenas, os registos adquiridos a partir do momento em que se estabelece um “equilíbrio dinâmico” entre a movimentação do navio e a agitação gerada.

Os testes experimentais foram realizados com agitação irregular de crista longa, com uma altura de onda significativa de 3.0 m e com os seguintes períodos de onda de pico: 10, 12, 14, 16, 18 e 20 s. A sequência temporal de ondas geradas foi igual nos testes efectuados para estados de agitação com o mesmo período de onda de pico.

Os estados de agitação irregular foram definidos com base no espectro de JONSWAP (factor de forma igual a 3.3). Como se tratou de um estudo em águas de pequena profundidade (ou de profundidade intermédia), 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 forma realista, e sem serem “contaminadas” por efeitos indesejados de segunda ordem.

Os testes foram efectuados para uma profundidade de água junto ao Posto “A” igual a 20 m (no protótipo), que corresponde, sensivelmente, ao nível máximo de uma preia-mar de águas vivas. A duração dos testes foi a equivalente à geração de aproximadamente 1200 ondas.

3.2 Navio e sistema de acostagem e amarração

O navio seleccionado para o estudo pretende representar a classe dos navios de maior porte que podem utilizar o Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões, e estava, à data de realização deste estudo, fretado em exclusividade pela empresa *Galp Energia*. O Quadro 1 apresenta as principais características deste navio de 105 000 dwt, no protótipo e no modelo, para a condição de carga estudada.

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 longitudinal do centro de impulsão	128.41 m	1.284 m
Período natural da oscilação de balanço	12.5 s	1.25 s

O modelo do navio, depois de construído, foi calibrado, de forma a reproduzir o comportamento dinâmico e hidrodinâmico do navio real (no protótipo) para a condição de carga máxima. Nesta fase, com base em procedimentos iterativos, foi efectuado o ajuste da distribuição de massas do modelo, de forma a posicionar correctamente o seu centro de gravidade e obter os períodos naturais de oscilação pretendidos segundo os modos de oscilação verticais. Rita, 1984, e Rosa-Santos, 2010, descrevem as várias etapas da calibração de modelos de navios.

O modelo do navio foi amarrado no cais com fio de *kevlar* (rigidez muito elevada) e as relações constitutivas dos cabos de amarração e das defensas foram reproduzidas por uma associação de molas helicoidais. Dez transdutores de força possibilitaram a medição das forças aplicadas nesses elementos do sistema de amarração durante os testes realizados, Figura 8.

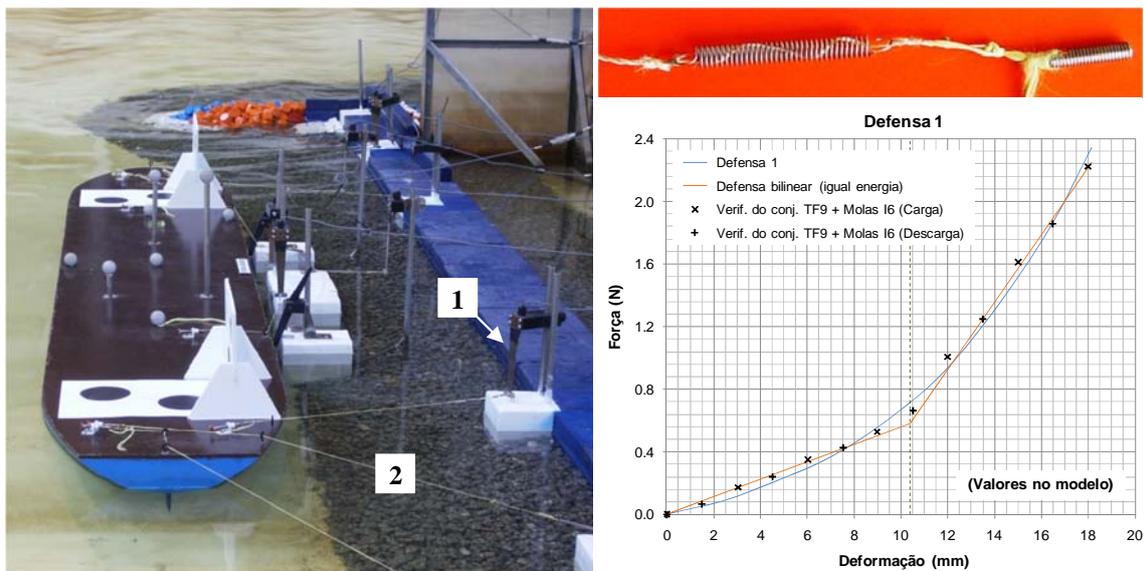


Figura 8 – Petroleiro amarrado no Posto “A”: (1) transdutor de força e (2) fio de amarração em *kevlar* (esquerda). Mola helicoidal com alongamento condicionado (direita, superior). Reprodução da curva de ‘força-alongamento’ de uma defesa não-linear recorrendo a uma aproximação bilinear (direita, inferior).

As curvas de ‘força-deformação’ (relações constitutivas) dos elementos do sistema de amarração têm, frequentemente, 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 comportamento linear, até à mesma deformação-limite. Esta técnica foi utilizada na reprodução dos cabos de amarração.

As características elásticas dos cabos de amarração (no protótipo) foram 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) foram reproduzidos no modelo através de um único cabo, com características elásticas equivalentes às do conjunto.

Como as defensas flutuantes instaladas no Posto “A” apresentam relações constitutivas muito não-lineares, e esta característica pode influenciar o comportamento do navio, foi utilizada uma aproximação bilinear para reproduzir essas relações no modelo, Figura 8 – direita. O Quadro 2 apresenta as características de todos os elementos do sistema de amarração para as condições de teste analisadas (valores relativos ao protótipo e aos dois cabos lançados em cada direcção para amarrar o navio no cais).

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

Designação	Comprimento (m)	Rigidez (kN/m)
Lançante de popa CA1	150	457.8
Lançante de popa CA2	90	598.1
Través de popa CA3	55	696.6
Regeira de popa CA4	55	697.3
Regeira de proa CA5	82	611.2
Través de proa CA6	82	610.4
Lançante de proa CA7	90	583.5
Lançante de proa CA8	120	518.5
Defensa de proa ^(a) DF1	--	587.5 2146.7
Defensa de popa ^(a) DF2	--	576.3 2114.6

Nota: ^(a) rigidez do primeiro e do segundo trecho da curva bilinear utilizada na reprodução das relações constitutivas das defensas. A deformação associada à mudança de rigidez é de 1.02 m (nos dois casos).

Para garantir que os testes de uma determinada série eram realizados nas mesmas condições, foram instalados no modelo do navio, nas posições correspondentes à localização dos guinchos, mecanismos de ajuste das forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração, Figura 9.



Figura 9 – Pormenor do mecanismo de ajuste das forças aplicadas nos cabos de amarração (esquerda); posição dos quatro mecanismos instalados à proa do modelo do navio (centro); dispositivo de simulação das defensas (direita).

No estudo efectuado, as forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração foram fixadas entre 100 a 120 kN (valores relativos ao protótipo e a cada um dos cabos que são lançados em cada direcção para amarrar o navio no cais).

A Figura 9 – direita apresenta o dispositivo utilizado na simulação das defensas, constituído por um transdutor de força e um mecanismo articulado instalado na parte frontal do duque d’Alba. O contacto com o navio é materializado por um elemento esférico, que foi seleccionado de forma a proporcionar um coeficiente de atrito na interface “navio-defensa” igual a 0.45 – 0.48, e assim permitir a reprodução das condições existentes no protótipo (uma interface “aço-borracha”).

3.3 Intervenções no quebramar norte

Neste trabalho são analisadas comparativamente duas hipóteses alternativas de intervenção na cabeça do quebramar norte de Leixões, que visam a melhoria das condições operacionais e de segurança do Posto “A”. Estas intervenções procuram melhorar as condições de tranquilidade na envolvente desse posto de acostagem e foram desenvolvidas com base nos pressupostos seguintes: manutenção da área actualmente disponível para os navios realizarem a manobra de aproximação, rotação e acostagem no Posto “A”; facilidade de construção; e apresentarem um custo relativamente baixo. O custo dessas intervenções não foi estimado.

As intervenções na cabeça do quebramar norte estudadas experimentalmente consistiram: no prolongamento de um muro-cortina já existente, numa extensão de cerca de 30 m (coroamento à cota +11.5 m), segundo a direcção perpendicular ao alinhamento do quebramar, Figura 10; e na construção de um maciço aproximadamente circular em planta, com diâmetros exteriores de cerca de 35 m ao nível do topo e de 60 m ao nível da base, utilizando blocos de betão dispostos de uma forma irregular, Figura 11. O peso desses blocos era variável.

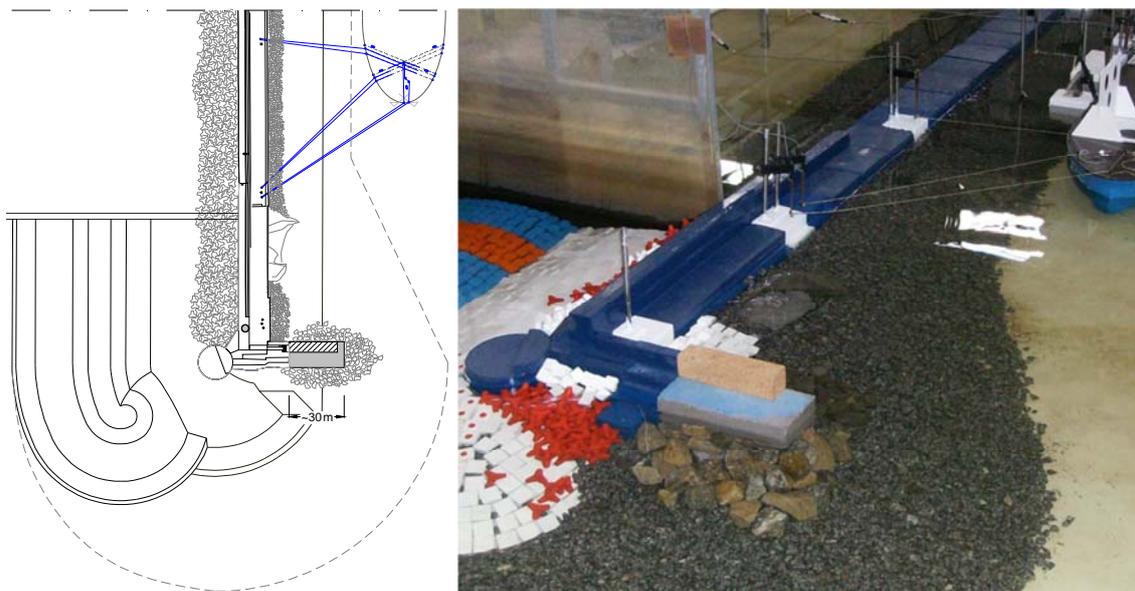


Figura 10 – Prolongamento de um muro-cortina segundo a direcção perpendicular ao desenvolvimento do quebramar norte.

O local de implantação das intervenções estudadas situa-se junto ao intradorso do quebramar norte de Leixões, perto da sua extremidade. Nesta zona existem afloramentos rochosos, assim como materiais resultantes dos estragos provocados por algumas tempestades muito violentas no quebramar principal (previamente à construção do quebramar submerso, no início da década de oitenta), que aí se foram acumulando. Assim, por um lado, o volume de material necessário à construção das estruturas é menor. Por outro lado, não se reduz o espaço útil disponível para a realização da manobra dos navios. A Figura 12 apresenta a extremidade do quebramar norte para um nível de água próximo de uma baixa-mar de águas vivas, evidenciando a zona referida (a sotamar da estrutura) e o quebramar submerso de protecção à cabeça do quebramar principal (a barlamar).

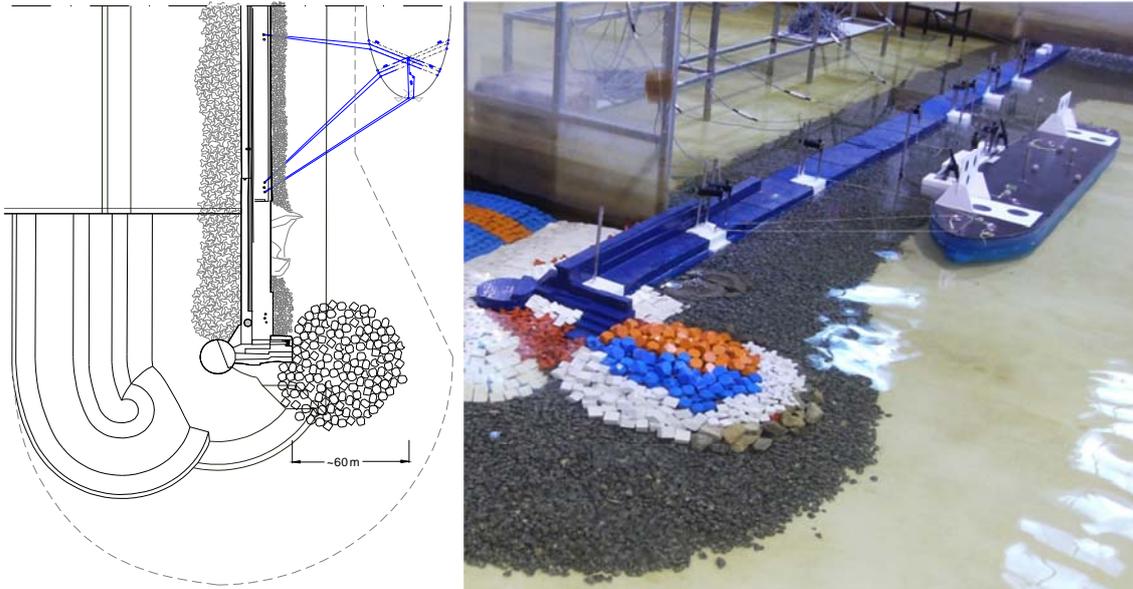


Figura 11 – Configuração e modelo físico do maciço.



Figura 12 – Extremidade do quebramar norte do Porto de Leixões.

Importa referir que não foram analisadas as repercussões que essas duas intervenções podem ter nas condições de agitação na bacia de manobra do navio. No entanto, devido ao seu carácter minimalista, é expectável que as condições de manobrabilidade dos navios não sejam afectadas de forma significativa.

A consideração de intervenções na cabeça do quebramar norte de maior desenvolvimento (ou extensão) implicaria, certamente, o seu avanço para zonas associadas a profundidades de água maiores e a provável redução da área útil disponível para a manobra do navio. Por outro lado, a criação de um 'obstáculo' de maiores dimensões à propagação da agitação para o interior do porto pode aumentar a probabilidade de ocorrência de problemas ressonantes na proximidade do Posto "A", na medida em que fecha, ainda que parcialmente, a bacia que lhe está associada.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS INTERVENÇÕES

A análise comparativa (preliminar) das intervenções na cabeça do quebramar norte de Leixões é realizada tendo como referência a situação actual, e foi baseada no estudo do comportamento de um navio amarrado no Posto "A", para diferentes condições de agitação marítima.

A Figura 13 apresenta a amplitude significativa dos movimentos do navio para a situação actual, segundo os seus seis graus de liberdade, bem como a redução (em percentagem) da amplitude desses movimentos, para as duas intervenções estudadas: o prolongamento do muro-cortina e a construção de um maciço circular. Os resultados são apresentados em valores do protótipo, em função do período de onda de pico da agitação, e referem-se a testes efectuados para uma altura de onda significativa incidente de 3.0 m (no exterior do porto). As condições de agitação reproduzidas na instalação experimental foram verificadas, em todos os testes efectuados, com base na análise dos registos simultâneos de elevação da superfície livre da água das sondas S1 a S4, Figura 5.

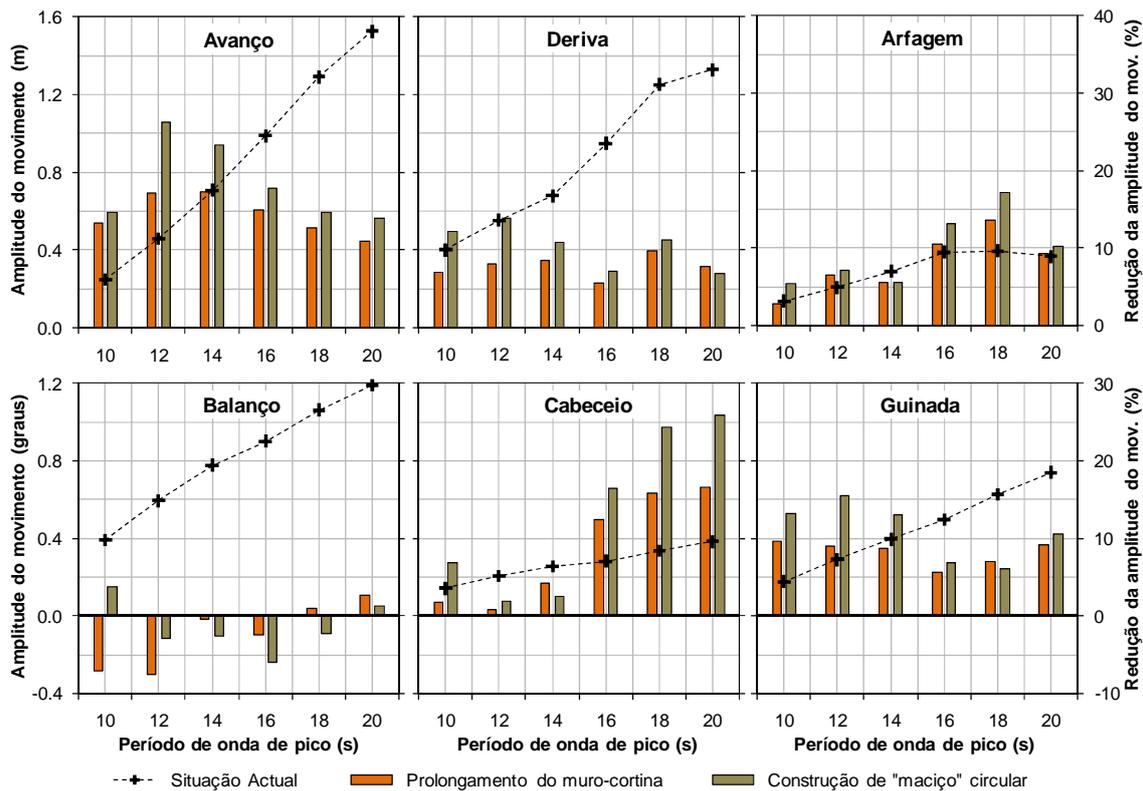


Figura 13 – Amplitude significativa dos movimentos do navio (valores pico-a-pico) para a situação actual, e redução da amplitude desses movimentos para as intervenções na cabeça do quebramar consideradas.

A amplitude dos movimentos do navio amarrado tende a aumentar com o período de onda de pico, tanto nos testes realizados para a condição actual da cabeça do quebramar norte (Figura 13), como para as duas situações que resultam das intervenções analisadas para esse trecho da estrutura (conclusão que não resulta directamente da análise da Figura 13).

Embora se trate de um estudo comparativo preliminar, os resultados apresentados na Figura 13 permitem concluir que as duas intervenções analisadas melhoram as condições operacionais do Posto “A” em relação à situação actual. Com efeito, pode verificar-se que a amplitude dos movimentos de avanço, deriva e guinada (movimentos que mais influenciam a segurança e a eficiência das operações realizadas num terminal para petroleiros, Bruun, 1983) diminui para essas condições de teste, sendo a redução maior no caso do movimento de avanço. Os modos de arfagem e de cabeceio apresentam tendências semelhantes. A excepção é o movimento de balanço, que regista um (ligeiro) aumento de amplitude, para alguns períodos de onda de pico, em resultado da alteração da cabeça do quebramar norte.

A construção de um “maciço” circular com blocos de betão dispostos de forma irregular parece ser mais eficaz do que o prolongamento do muro-cortina, segundo a direcção perpendicular ao quebramar norte. Por exemplo, a redução da amplitude da oscilação de avanço situa-se entre 14 e 26% no primeiro caso e entre 11 e 17% no segundo, comparativamente à situação actual.

Estes resultados podem ser explicados, em parte, pelo maior desenvolvimento lateral do maciço circular (aproximadamente 60 m ao nível da base) e pela porosidade desta estrutura, que assim deverá promover de uma forma mais eficaz os processos de dissipação da energia da agitação incidente, durante a sua difracção em torno da cabeça do quebramar norte.

Pode afirmar-se que as conclusões que foram apresentadas estão em conformidade com o que era expectável tendo em conta a natureza das intervenções analisadas. O estudo experimental realizado permitiu distingui-las com base na sua eficácia no melhoramento do comportamento do navio amarrado.

Importa frisar que nem sempre a melhoria das condições de abrigo do cais, para ondas de curto período, através da modificação dos quebramares (*e.g.* comprimento, configuração), é favorável para o comportamento dos navios amarrados. Se a essa modificação corresponder uma entrada no porto mais estreita, a bacia portuária poderá ficar mais exposta a fenómenos ressonantes. As intervenções consideradas, pelo seu carácter minimalista, não parecem influenciar as condições de ressonância na área adjacente ao Posto “A”, pelo que ao aumento do grau de abrigo desse posto de acostagem corresponde uma melhoria do comportamento do navio amarrado.

A eficácia das soluções apresentadas é inferior à que se conseguiria obter através do aumento das forças de pré-tensão aplicadas nos traveses, na situação em que as defensas instaladas no cais apresentam um coeficiente de atrito elevado na interface com o casco do navio (idêntico ao considerado neste trabalho). Nessas condições, a redução da amplitude dos movimentos de avanço seria de cerca de 35 a 50%, mas inferior no caso dos movimentos de deriva (apenas 10 a 20% de redução), Rosa-Santos *et al.*, 2010. É importante referir que o aumento das forças de atrito na interface “navio-defensas” requer um controlo mais frequente e rigoroso das condições de amarração do navio, para que as forças de pré-tensão aplicadas nos cabos de amarração possam ser ajustadas às condições do ambiente marítimo, e às mudanças do estado de carga do navio e do nível de água junto ao cais.

Intervenções mais profundas na cabeça do quebramar norte de Leixões poderão resultar numa melhoria mais significativa das condições de operacionalidade e de segurança do Posto “A”. No entanto, os pressupostos que estiveram na génese das hipóteses estudadas devem ser tidos em conta na concepção dessas intervenções.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se estudam as condições operacionais de um terminal portuário considerando como acção principal (e única) a agitação marítima, é importante ter em atenção que se está a excluir a influência que as outras forças do ambiente marítimo podem ter no comportamento do navio amarrado.

Para o estudo experimental foi construído um modelo físico realista do Posto “A” e da sua área envolvente, que incluiu a reprodução da estrutura de acostagem, das principais obras de abrigo portuário e das praias. No entanto, os problemas operacionais que por vezes ocorrem no Posto “A” não resultam, apenas, da acção da agitação marítima que se propaga para esse posto de acostagem, depois de difractar em torno da cabeça do quebramar norte ou após ser reflectida nas fronteiras físicas existentes.

De facto, IHRH–FEUP/CEHIDRO–IST, 2005, refere que as condições de operacionalidade e de segurança do Posto “A” podem também ser influenciadas pela ocorrência de galgamentos do quebramar norte (especialmente no trecho adjacente ao Posto “A”), e pela transmissão através da estrutura desse quebramar. Como já foi referido anteriormente, estes fenómenos não foram reproduzidos no modelo, pois seriam afectados por efeitos de escala significativos, em resultado da não utilização de uma semelhança completa e da escala seleccionada. O aumento do factor de escala geométrico adoptado (*i.e.*, do quociente entre o valor de uma grandeza dimensional no modelo e no protótipo) para valores em que os efeitos de escala referidos pudessem ser desprezados não é praticável. Por exemplo, para um factor de escala igual a 1/50, a massa do petroleiro seleccionado para o estudo, na condição de carga máxima, seria aproximadamente igual a 960 kg. Por outro lado, a instalação experimental utilizada não permitiria a reprodução da área portuária considerada.

Neste estudo foram tomadas várias medidas no sentido de minimizar os efeitos laboratoriais no interior do tanque de ondas, nomeadamente a reflexão da agitação marítima nas fronteiras que não têm correspondência no protótipo. Como apenas foi possível reproduzir no modelo físico a parte mais exterior do porto, na área correspondente à entrada para o anteporto foi instalada uma praia absorvente perfurada, Figura 5. Adicionalmente, foi utilizado o sistema de absorção activa de reflexões integrado no sistema de geração de agitação marítima. A topo-hidrografia e o comprimento da praia de Matosinhos foram também adaptados para minimizar a ocorrência de reflexões indesejadas nas paredes laterais do tanque de ondas. Por outro lado, procurou-se garantir que as ondas de longo período ligadas se propagavam no modelo físico de uma forma realista, através da introdução de uma compensação de segunda ordem no sinal de controlo do movimento das pás do sistema de geração.

No que concerne à reprodução das características elásticas do sistema de amarração, como as defensas apresentavam relações constitutivas muito não-lineares, adoptou-se uma aproximação bilinear para simular, no modelo, as curvas de força-deformação que traduzem essas relações.

Os dispositivos utilizados na reprodução das defensas não permitem a simulação do efeito de histerese. Por um lado, esse efeito raramente é simulado nos estudos experimentais. Por outro lado, as defensas pneumáticas têm um comportamento reflectivo, pelo que esse efeito deverá ter uma importância secundária no estudo realizado.

Rosa-Santos, 2010, apresenta uma análise pormenorizada dos efeitos de escala e laboratoriais, bem como das condicionantes que estiveram associadas à realização do estudo experimental.

Estas considerações finais devem ser tidas em conta na análise dos resultados experimentais apresentados e na interpretação das conclusões obtidas neste trabalho que, como foi referido, é relativo à análise comparativa preliminar de duas intervenções na cabeça do quebramar norte de Leixões.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas duas intervenções distintas na cabeça do quebramar norte de Leixões. No local de implantação dessas intervenções existem alguns afloramentos rochosos e materiais acumulados, o que minimizaria o volume de material que seria necessário mobilizar para a sua construção, bem como os custos que lhe estão associados. Por outro lado, o espaço actualmente disponível para a realização das manobras de aproximação, rotação e acostagem no Posto "A" não seria alterado, devido ao carácter minimalista das intervenções preconizadas.

As duas intervenções analisadas têm um efeito positivo no comportamento do navio amarrado, uma vez que permitem reduzir a amplitude dos seus movimentos. A construção de um "maciço" circular com blocos de betão dispostos de uma forma irregular parece ser mais eficaz do que o prolongamento de um muro-cortina, segundo a direcção perpendicular ao quebramar. Contudo, para as condições de teste mais favoráveis, a redução da amplitude dos movimentos do navio não ultrapassa, em geral, os 25%. A maior eficácia do "maciço" circular deverá resultar do seu maior desenvolvimento em planta e da porosidade da estrutura.

O estudo comparativo foi realizado com base em resultados obtidos no âmbito de um projecto de investigação científica e de uma dissertação de doutoramento. O eventual desenvolvimento das soluções apresentadas poderá contribuir, no futuro, para o aumento da sua eficácia no que concerne à melhoria das condições operacionais e de segurança do Posto "A".

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 cedido pelo LNEG e IST-UTL.

REFERÊNCIAS

Bruun, P., 1983. *Mooring and Fendering Rational Principles in Design*. Proc. of the 8th International Harbour Congress, Antwerp, June 13-17.



**7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Porto, 6 e 7 de Outubro de 2011**

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.