

COMPORTAMENTO DE NAVIOS AMARRADOS NO POSTO “A” DO PORTO DE LEIXÕES: IMPORTÂNCIA DA REPRODUÇÃO DO CARÁCTER IRREGULAR DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NOS ESTUDOS EM MODELO FÍSICO

Behavior of Moored Ships at Berth “A” of the Port of Leixões: Importance of Reproducing the Irregular Character of Waves in the Physical Model studies

PAULO ROSA-SANTOS ⁽¹⁾, FERNANDO VELOSO-GOMES ⁽²⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽³⁾
e EMÍLIO BRÓGUEIRA-DIAS ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Estudante de Doutoramento, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, pjrs@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, vgomes@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Administrador dos Portos do Douro e Leixões S.A., APDL,
Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, brogueira.dias@apdl.pt

Resumo

As interações entre o navio, o sistema de amarração, e a própria bacia portuária são usualmente complexas, com o navio a apresentar uma resposta tipicamente não linear, em relação às solicitações exteriores a que é submetido. Neste contexto, a modelação física assume um papel de relevo. No entanto, para que os resultados e as conclusões obtidos com essa ferramenta possam ser encarados com confiança, é fundamental que os principais fenómenos físicos que governam a resposta de navios amarrados sejam correctamente reproduzidas no modelo físico, em particular a agitação marítima. O presente trabalho procura realçar a importância do uso de agitação irregular nos estudos em modelo físico em que se pretende avaliar a resposta de sistemas dinâmicos não-lineares, como é o caso de um navio amarrado no interior de um porto. Com esse intuito, analisa-se o comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões quando submetido a agitação marítima regular e irregular de vante, para diferentes condições de teste.

Palavras-chave: Estruturas de acostagem e amarração, condições de operacionalidade, períodos naturais de oscilação.

Abstract

The interactions between the ship, the mooring system, and the harbor basin are usually complex, with the moored ship having typically a non linear response to the environmental forcing actions. In this context, physical modeling plays an important role. However, in order to obtain reliable results and conclusions, it is essential that the main physical phenomena governing the response of the moored ships are accurately reproduced in the physical model, particularly the wave conditions. The paper intends to enhance the importance of using irregular waves on the studies aiming to evaluate the response of non-linear dynamic systems, which is the case of a ship moored inside a harbor basin. Therefore, the behavior of an oil tanker moored at Berth “A” of the Leixões Oil Terminal was analyzed under the action of regular and irregular head waves, for different test conditions.

Keywords: Berthing and mooring structures; operational conditions, natural periods of oscillation.

1. Introdução

Com o aumento do volume de mercadorias envolvidas nas trocas comerciais realizadas por via marítima, torna-se cada vez mais importante dotar os portos de terminais seguros e eficientes, contribuindo para o aumento da competitividade e da rentabilidade destas infra-estruturas, bem como para a minimização dos riscos de segurança e ambientais associados. Neste contexto, e perante a complexidade que a problemática do comportamento de navios amarrados em portos tem subjacente, a modelação física assume um papel de relevo, possibilitando o estudo e o projecto de novas instalações portuárias optimizadas, bem como a melhoria das condições de operacionalidade e de segurança em portos e terminais já existentes.

Para que os resultados e as conclusões obtidos pela via da modelação física possam ser encarados com confiança é, no entanto, necessário que o modelo reproduza com rigor as características mais relevantes do protótipo, incluindo as acções do ambiente marítimo e portuário. Pese embora o facto de muitos estudos em modelo físico reduzido serem conduzidos com agitação regular (caracterizada unicamente por uma altura e por um período de onda), procurando-se com esta simplificação melhorar, por exemplo, a compreensão do comportamento de modelos complexos nas fases preliminares de um estudo, é, no entanto, fundamental a consideração do carácter irregular da agitação quando se pretende avaliar com algum rigor a resposta não linear de sistemas dinâmicos, como é o caso de um navio amarrado no interior de um porto marítimo.

De facto, a resposta de um navio amarrado no plano horizontal é usualmente controlada pelos períodos naturais introduzidos pelo sistema de amarração. Como a massa do navio é relativamente elevada quando comparada com a rigidez do sistema de amarração, esses períodos naturais tendem a ser significativamente mais elevados que os períodos característicos da agitação marítima. Por esta razão, as componentes não lineares da agitação marítima, relacionadas com efeitos de segunda ordem, assumem um papel de relevo.

Neste artigo analisa-se o comportamento de um navio amarrado no Posto “A” do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões, quando submetido a agitação marítima regular e irregular de vante. Na análise dá-se especial destaque aos movimentos do navio com mais influência nas condições de operacionalidade de um terminal de petroleiros. São também apresentadas sumariamente as técnicas de medição utilizadas no estudo, e as metodologias de calibração do modelo físico, construído à escala geométrica 1/100.

2. Caracterização do Caso de Estudo

O Porto de Leixões situa-se no Norte de Portugal, na foz do Rio Leça, e a aproximadamente 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 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 melhores condições de descarga para a classe dos navios de maior porte que demandam a Leixões durante condições marítimas adversas.

O Posto “A” pode ser usado por uma variada gama de navios. Os navios de maior porte que normalmente usam este posto possuem um comprimento total de 250 m, calado máximo de 14 m, e deslocamento para 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 em fibras sintéticas.

A estrutura de acostagem é composta por duques d’Alba de acostagem e 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” do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões.

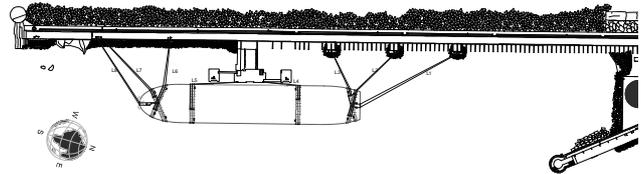


Figura 2. Layout de amarração mais usual para os navios de maior porte que usam o Posto “A” do Terminal de Petroleiros de Leixões.

Devido essencialmente à sua localização, podem ocorrer alguns problemas hidrodinâmicos e operacionais no Posto “A”, IHRH-FEUP/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 de granéis líquidos. Uma descrição detalhada das condições operacionais do Posto A” pode ser encontrada em IHRH-FEUP/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. Na primeira fase recorreu-se a um modelo físico simplificado do Posto “A” e área envolvente. 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.

Neste artigo são apenas apresentados e analisados os resultados dos testes realizados com o objectivo de avaliar a importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima nos estudos em modelo físico em que se pretende analisar o comportamento de navios amarrados.

Na segunda fase do estudo (em preparação) será reproduzida no tanque de ondas a geometria do quebramar Norte do Porto de Leixões, em especial a zona da cabeça. A agitação marítima, por difracção em torno da cabeça do quebramar, atingirá o modelo do navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem. Está também prevista a construção de um novo modelo físico de um navio do tipo petroleiro à escala geométrica 1/75. A comparação dos resultados obtidos com os dois modelos permitirá avaliar a magnitude de eventuais efeitos de escala.

3.2 Modelo físico

Na primeira fase do estudo foram reproduzidas no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP (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 avaliar o comportamento de um navio amarrado no Posto "A" sob a acção directa 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). Definiram-se condições de agitação marítima realistas, que tiveram em consideração a localização do Posto "A".

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 3. Este tanque de ondas possui 28 m de comprimento, 12 m de largura e profundidade de 1,2 m.

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 3. Na extensão oposta do tanque de ondas foi instalada uma praia de dissipação, para reduzir a reflexão da agitação marítima.

O navio do tipo petroleiro seleccionado para o estudo em modelo físico 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 dwt. O Quadro 1 apresenta algumas das principais características deste navio para a condição de carga testada, quer no protótipo, quer no modelo físico construído à escala geométrica 1/100.

Quadro 1. Características do navio do tipo petroleiro para a condição de carga testada.

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 long. do centro de impulsão	128,41 m	1,284 m
Período natural da oscilação de Rolo	12,5 s	1,25 s

O primeiro 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).

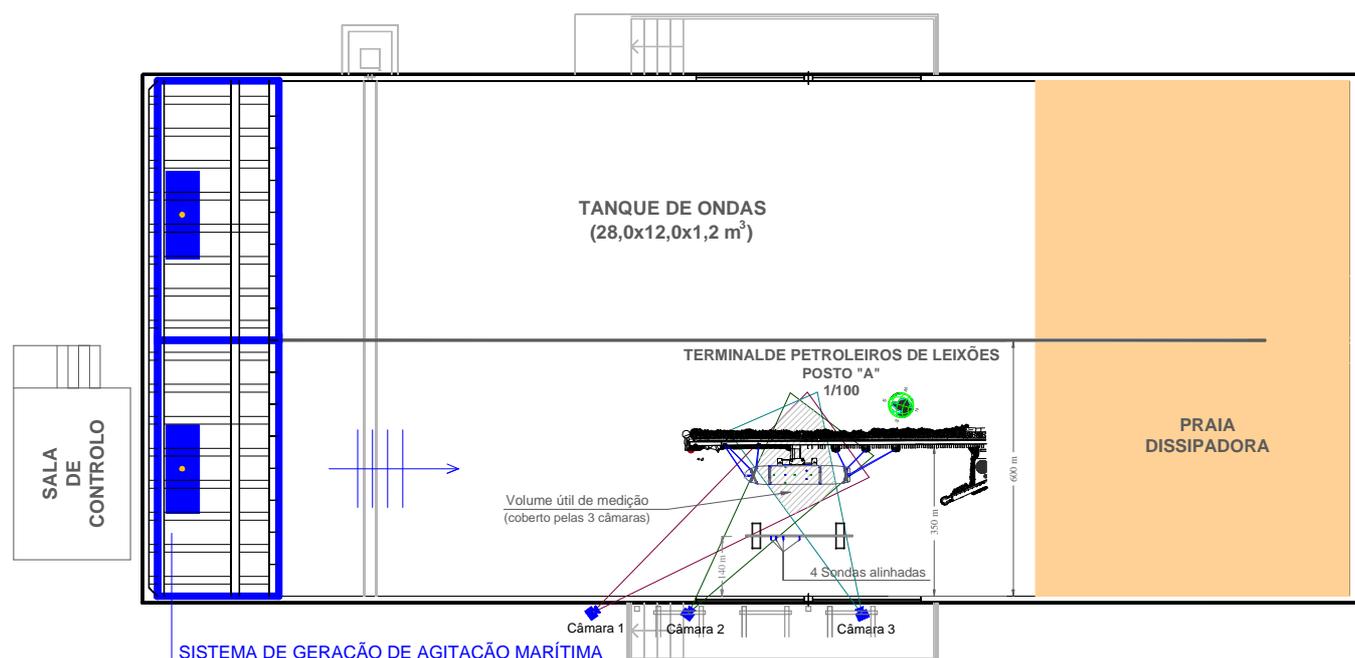


Figura 3. Esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas: 1.ª fase do estudo.

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, Figura 4.



Figura 4. Modelo físico do navio do tipo petroleiro amarrado à estrutura de acostagem e amarração (modelo simplificado).

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 oito cabos de amarração duplos, e encontra-se esquematizado em detalhe na Figura 5.

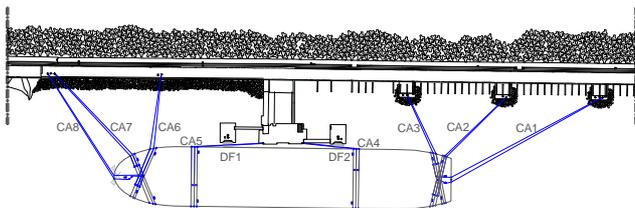


Figura 5. Pormenor do layout de amarração do navio, com identificação dos cabos de amarração e das defensas.

As características dos cabos de amarração utilizados pelos navios do tipo petroleiro que usam o terminal podem variar de navio para navio, mas é frequente o uso de cabos de amarração em aço com extremidades de amarração em fibras sintéticas (frequentemente a poliamida, embora outros materiais sintéticos possam também ser usados). As forças mínimas de rotura desses cabos de amarração estão, usualmente, compreendidas entre 650 e 900 kN. Neste estudo foram usados cabos de amarração com força mínima de rotura de 650 kN.

As características de elasticidade 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 sensor 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 destes 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 de cada um dos cabos usados na amarração do modelo do navio, bem como a rigidez "linearizada" desses cabos de amarração e das defensas, no modelo físico.

Quadro 2. Características dos cabos de amarração e das defensas, no modelo físico.

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

3.3 Equipamentos

O sistema de geração de ondas actualmente instalado no tanque de ondas do LH-FEUP, desenvolvido pela *HR Wallingford, U.K.*, é do tipo multielementos, e está equipado com um sistema dinâmico de absorção de reflexões, Taveira Pinto *et al.* (2007). 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 (três movimentos de translação e três movimentos de rotação).

A Figura 6 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*).

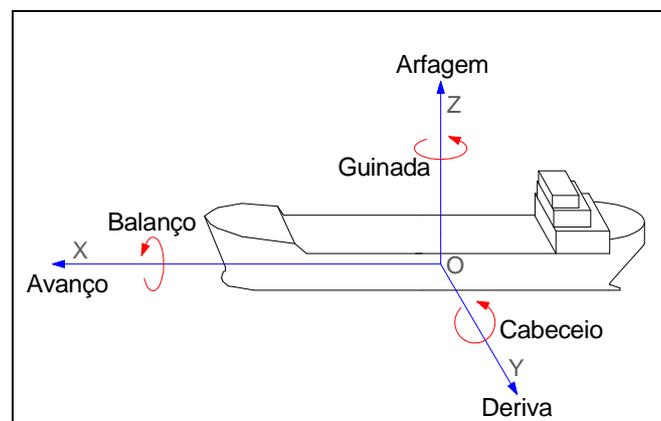


Figura 6. Tipos de movimentos de um navio.

O sistema de medição *Qualisys* é composto por três câmaras digitais de infravermelhos, e permite a medição dos movimentos do navio sem necessidade de contacto com o modelo físico. O posicionamento das câmaras usadas está esquematizado na Figura 3.

As forças nos cabos de amarração e nas defensas foram medidas, de forma contínua, através de um conjunto de 10 sensores de força. As séries de dados 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).

3.4 Condições de teste

Para avaliar a importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima nos estudos em que se pretende analisar o comportamento de navios amarrados, foram comparados os resultados de ensaios efectuados em modelo físico com agitação regular e irregular. No estudo foram geradas ondas com características semelhantes às que previsivelmente chegam à zona do Posto "A", após difracção em torno da cabeça do quebramar Norte do Porto de Leixões.

Os estados de agitação irregular foram definidos com base no espectro de JONSWAP, considerando um factor de forma, γ , igual a 3,3. Com o objectivo de caracterizar convenientemente esses estados de agitação, os testes foram realizados com sensivelmente 600 ondas. As quatro sondas instaladas na vizinhança do modelo físico, Figura 3, permitiram controlar as condições de agitação geradas, através da determinação da altura de onda significativa incidente e reflectida, em cada ensaio.

Nos testes com agitação regular, a resposta do navio amarrado estabiliza ao fim de algum tempo. Assim, ultrapassados os instantes iniciais, as oscilações do navio passam a apresentar um comportamento sinusoidal, com uma amplitude máxima sensivelmente constante no tempo. Por este motivo, nestes testes, apenas foram consideradas, aproximadamente, 300 ondas.

Quando se estudam estados de agitação com ondas regulares, a análise espectral deixa de fazer sentido, uma vez que a densidade espectral se concentra numa frequência única, com largura infinitesimal. A aplicação de rotinas desenvolvidas para a análise da reflexão de ondas irregulares, baseadas em técnicas de análise espectral, poderá ser contraproducente nestes casos. Os coeficientes de reflexão obtidos, e consequentemente as alturas de onda incidente e reflectida, poderão distanciar-se claramente dos reais, dado que a análise espectral tenderá a distribuir alguma energia contida na frequência da agitação, por uma ou várias bandas de frequências próximas.

Adicionalmente, nesses casos, a altura de onda significativa, determinada com base numa análise espectral, será sempre mais elevada que a altura determinada com base na análise estatística do registo. De facto, a altura de onda significativa determinada com base num espectro de variância é dada por,

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad [1]$$

em que m_0 representa o momento de ordem zero desse espectro.

Considerando que a energia da onda regular se concentra apenas numa banda de frequências, ou seja, que a densidade espectral nas bandas adjacentes é zero, temos que m_0 é igual a,

$$m_0 = \frac{a_0^2}{2} \quad [2]$$

em que a_0 representa a amplitude da onda regular. Como a altura da onda incidente, H , é igual a $\frac{1}{2}$ de a_0 , temos que,

$$H_s = 4\sqrt{\frac{a_0^2}{2}} \rightarrow H_s = H\sqrt{2}. \quad [3]$$

Tendo em conta o referido, neste trabalho, a altura de onda nos testes com agitação regular refere-se à altura significativa que resulta da análise estatística efectuada pelo software *HR WaveData*, desenvolvido pela *HR Wallingford, UK*.

Dado que num teste com ondas regulares, após o período inicial de arranque do sistema de geração, a altura de onda estabiliza, o parâmetro referido representará, sem grande erro, a altura de onda medida em cada sonda.

Apesar da utilização de uma praia de dissipação ao fundo tanque de ondas, parte da energia da agitação é reflectida e regressa à zona de implantação do modelo. Por esse motivo, nos testes com ondas regulares, admitiu-se que a altura de onda incidente no modelo corresponderia à média da altura medida nas quatro sondas instaladas na sua vizinhança.

Os esforços iniciais em todos os cabos de amarração do navio foram fixados entre 100 e 120 kN. Estes valores foram ajustados antes do início da série de testes, e confirmados no final de cada um dos testes realizados.

O nível de água no tanque foi considerado igual a 0,18 m (18 m no protótipo), o que corresponde sensivelmente ao nível médio da água do mar.

4. Períodos Naturais de Oscilação do Navio

Antes do início da série de testes em modelo físico, foram determinados os períodos naturais de oscilação do navio amarrado. Estas experiências são realizadas com o navio amarrado, em condições de águas paradas (sem ondas), e para a profundidade de água de teste.

A metodologia utilizada consistiu na aplicação de uma força (ou momento) no navio que, em relação 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.

A Figura 7 mostra, como exemplo, uma das experiências realizadas para a determinação do período natural da oscilação de avanço.



Figura 7. Determinação do período natural da oscilação de avanço, por aplicação de força à proa do navio.

Durante a realização das experiências, os movimentos do navio são medidos, de forma contínua, com o sistema *Qualisys*. A Figura 8 mostra, como exemplo, as séries temporais de oscilação do navio amarrado, para os modos de avanço, balanço e cabeceio (no modelo).

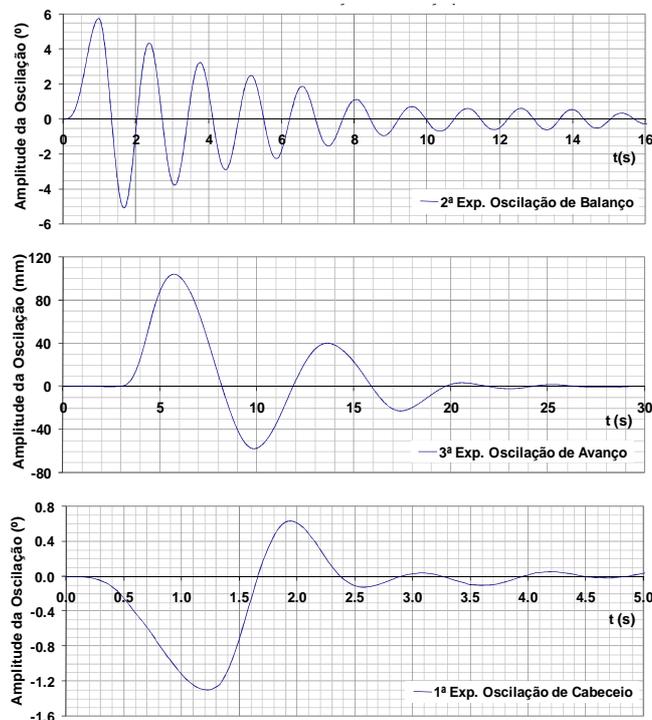


Figura 8. Séries temporais de oscilação do navio amarrado, para os modos de avanço (superior), balanço (meio) e cabeceio (inferior).

Os modos de oscilação apresentados na Figura 8 apresentam diferentes graus de amortecimento. Verifica-se que a oscilação de cabeceio é a mais fortemente amortecida. Este facto dificulta a determinação do seu período natural de oscilação. A oscilação de balanço é a que apresenta o amortecimento mais fraco.

Dos restantes modos de oscilação, o de arfagem é também fortemente amortecido. Os modos de guinada e de deriva encontram-se numa situação intermédia, entre o modo de balanço e o modo de cabeceio (ou de arfagem).

O Quadro 3 apresenta os valores médios dos períodos naturais de oscilação, para cada um dos modos de oscilação do navio amarrado (no protótipo).

Esses períodos foram determinados com o navio petroleiro em condição de carga máxima, amarrado no Posto “A” com um esquema de amarração assimétrico, e com uma profundidade de água junto ao cais de 18 m (no protótipo).

Quadro 3. Períodos naturais de oscilação do navio amarrado (valores de protótipo).

Movimentos do navio		Tnat(s)
Horizontais	Avanço	77,5
	Deriva	77,4
	Guinada	55,5
Verticais	Arfagem	16,5
	Balanço	14,0
	Cabeceio	14,5

Os valores apresentados no quadro resultam da média dos resultados de pelo menos quatro experiências, isto é, cada experiência foi repetida, para cada modo de oscilação, pelo menos duas vezes para cada um dos sentidos do movimento. Por exemplo, para o modo de avanço, a experiência foi repetida três vezes à proa e três vezes à popa. Alguns períodos naturais de oscilação tendem a variar, ligeiramente, com a amplitude do movimento que é imposto inicialmente ao navio amarrado. Esta variação é mais significativa para os modos de arfagem e de cabeceio.

Verifica-se que os períodos naturais de oscilação do navio no plano horizontal são consideravelmente superiores aos obtidos para os modos de oscilação no plano vertical, que apresentam valores na gama dos períodos típicos da agitação marítima. Os períodos naturais dos modos de arfagem e de cabeceio são os de mais difícil determinação e, consequentemente, os que apresentam menor rigor.

5. Análise de Resultados

5.1. Rotina de análise de resultados em MatLab

Para facilitar a análise dos resultados obtidos com o sistema de medição de movimentos *Qualisys*, foi desenvolvida uma rotina de cálculo automático em MatLab. Esta rotina permite fazer uma análise estatística e espectral das séries temporais dos movimentos do navio amarrado (avanço, deriva, arfagem, balanço, cabeceio e guinada).

Existe também a possibilidade de comparar a distribuição em frequência da amplitude das oscilações do navio (valores pico-a-pico), segundo cada um dos modos de oscilação, de acordo com distribuição teórica de *Rayleigh*. Esta distribuição é definida com base no momento de ordem zero do espectro de variância das séries temporais dos movimentos do navio.

A rotina desenvolvida requer interação com o utilizador durante o processamento dos resultados, quer ao nível da definição de parâmetros e opções de análise, quer no modo de visualização e exportação dos resultados. Estes podem apenas ser vistos no MatLab, guardados sob a forma de imagens, ou exportados directamente para uma folha de Excel. A análise de cada série temporal pode ser realizada considerando as oscilações do navio em relação à sua posição de repouso (antes do início do teste), ou em relação à posição média do navio durante o teste.

No módulo de análise estatística a rotina determina, para cada série temporal, o nº de oscilações, as amplitudes de oscilação (média, significativa, média do décimo superior, e máxima), bem como, os respectivos períodos de oscilação associados. São também determinadas a semi-amplitude máxima e mínima, relativamente à posição de repouso do navio. A contagem das oscilações do navio pode ser realizada com base na técnica dos zeros ascendentes ou descendentes.

Os limites operacionais para os movimentos de navios amarrados são, normalmente, definidos com base em amplitudes pico-a-pico (e.g. PIANC, 1995). A única excepção é o movimento de deriva, para o qual se considera o afastamento do navio relativamente ao cais.

A definição de amplitude pico-a-pico não é, por vezes, clarificada. Na sua forma mais primitiva, essa amplitude poderá ter correspondido à amplitude entre um máximo e um mínimo consecutivos, ou o inverso.

Se procurarmos estabelecer limites de segurança para os movimentos de navios amarrados em portos, e se a atenção recair especialmente sobre as forças nos cabos de amarração (que poderão originar a sua rotura), constatamos que o critério máximo - mínimo consecutivo é mais falível que um critério que se baseie numa amplitude de oscilação do tipo zero ascendente ou descendente, em que se exige que o navio passe pela posição de repouso. Em condições normais de utilização, a atenção está centrada, essencialmente, na eficiência e na segurança das operações de carga e descarga do navio. No caso particular de um terminal de petroleiros, atendendo às características do sistema de descarga, verificamos, mais uma vez, a melhor adequação de um sistema de contagem de oscilações que se baseie num princípio de zeros ascendentes ou descendentes. Este critério é o adoptado em PIANC, 1995.

Como já se referiu anteriormente, as defensas instaladas no Posto "A" são do tipo pneumático. Este tipo de defensas apresenta uma curva de carga-deformação com um comportamento marcadamente não-linear. Para forças de reacção baixas, a defesa deforma-se consideravelmente (rigidez baixa). À medida que a força de reacção aumenta, a rigidez da defesa aumenta consideravelmente.

Este tipo de comportamento conduz a uma semi-amplitude negativa de deriva que, por vezes, é da mesma ordem de grandeza da semi-amplitude positiva (afastamento do navio em relação ao cais). Por este motivo, nesta análise, as oscilações de deriva são caracterizadas com base em amplitudes pico-a-pico, à semelhança do que é efectuado para os restantes movimentos do navio amarrado.

Previamente à realização da análise espectral das séries temporais do movimento do navio, procuraram remover-se as frequências parasitas, de baixa frequência, por aplicação de um filtro passa-alto, do tipo *Butterworth* (6.º ordem).

Adoptou-se uma frequência de corte igual a 0,003125 Hz, que está suficientemente afastada das frequências de pico esperadas para os espectros de variância associados aos movimentos do navio, de modo a evitar a eliminação de energia em frequências com interesse para a análise.

A análise espectral é realizada com base no algoritmo da *Fast Fourier Transform* - FFT. A rotina desenvolvida estima a densidade espectral de potência com base na técnica do periodograma modificado, aplicando uma janela de *Hanning*. Os espectros de variância obtidos, ao invés de se referirem à elevação da superfície livre da água em relação a um nível médio, consideram os movimentos do navio amarrado em relação à sua posição média.

Na análise, as séries temporais dos movimentos do navio são divididas num determinado número de blocos, tendo-se considerado uma sobreposição de 50% entre blocos consecutivos. O número de pontos em cada bloco (largura da janela espectral) é definido pelo utilizador, e é uma potência de base 2. A densidade espectral de potência de cada série temporal resulta da média das FFT estimadas para cada um desses blocos de registos. Este procedimento permite minimizar a variância do espectro de potência. Aumentando o número de pontos em cada bloco, reduz-se o número de blocos em que a série temporal é subdividida e, conseqüentemente, o número de FFT consideradas na média. Este procedimento aumenta a resolução em frequência, incluindo, no entanto, também, ruído (espectros muito irregulares). Reduzindo o número de pontos em cada bloco obtêm-se espectros mais suaves, mas com uma resolução em frequência menor. Por outras palavras, quanto maior for o número de pontos em cada bloco, maior será a variância e menor o viés.

5.2. Apresentação dos resultados

Para este trabalho foram seleccionados os testes realizados com agitação regular e irregular, com uma altura de onda de 1,5 m (altura de onda significativa - H_s , no caso de agitação irregular - valores de protótipo) e os seguintes períodos de onda (período de onda de pico - T_p , no caso de agitação irregular): 12 s, 16 s e 20 s, valores de protótipo. Os gráficos apresentados na Figura 9 comparam as amplitudes dos vários movimentos do navio amarrado (valores pico-a-pico) resultantes da análise desses testes. Para cada um desses movimentos são apresentadas as amplitudes máximas (Máx), as médias do décimo superior (1/10), as significativas (Sign) e as médias (Méd). 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. Essa técnica é actualmente a mais corrente, e a usada pelo software *HR Wave Data*, para a contagem de ondas.

Nos testes realizados com agitação regular, a resposta do navio amarrado varia consideravelmente nos instantes iniciais. Isto resulta, quer da fase transitória associada ao arranque do sistema de geração, em que a amplitude do movimento das pás varia desde zero até à amplitude correspondente ao estado de mar que se pretende gerar (aproximadamente 10 s), quer do tempo necessário à estabilização da resposta do navio. Após esta fase inicial, os movimentos do navio, segundo os seis graus de liberdade, passam a apresentar um comportamento oscilatório com amplitude sensivelmente constante. Para não prejudicar a análise, eliminou-se, em cada série temporal, o trecho inicial correspondente a 15% da duração do ensaio.

Por este motivo, as amplitudes de oscilações do navio, nos testes com agitação regular, são referidas à posição média do navio durante o tempo de ensaio restante.

Nos testes realizados com agitação irregular os efeitos referidos anteriormente são menos notórios. Nestes testes, foram apenas eliminados os registos iniciais de cada série temporal (desde o início do teste até o navio amarrado se começar a movimentar por efeito da agitação). Neste período de tempo (~10 s), o sistema de medição de movimentos regista, essencialmente, ruído, pelo que o sinal medido cruza, frequentemente, o nível de referência (neste caso o nível de repouso). A consideração deste período de tempo prejudicaria as análises realizadas com a rotina desenvolvida em MatLab, especialmente ao nível da contagem das oscilações do navio amarrado.

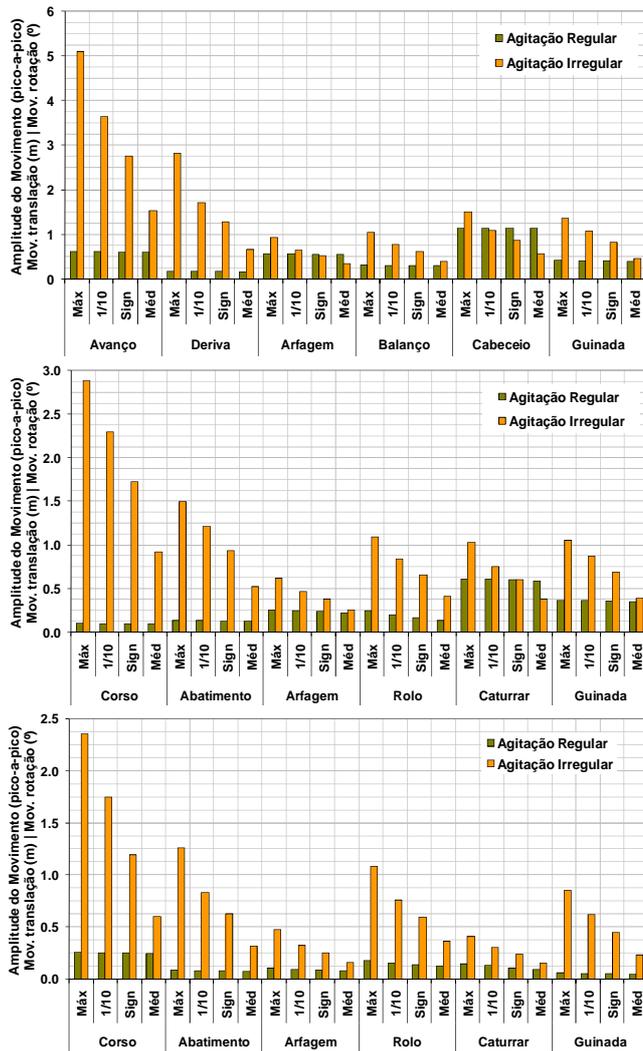


Figura 9. Amplitudes dos movimentos do navio amarrado (no protótipo), segundo cada um dos 6 GL. Testes com agitação regular e irregular, com uma altura de onda de 1,5 m, e períodos de onda de 20 s (superior), 16 s (intermédio), e 12 s (inferior).

Para qualquer um dos períodos testados, verifica-se que a utilização de agitação regular conduz a uma importante subavaliação da resposta do navio no plano horizontal (movimentos de avanço, deriva e guinada), qualquer que seja a categoria de movimento considerada. No plano vertical as diferenças são menos notórias, especialmente no caso dos movimentos de arfagem e de cabeceio, e nos testes realizados com os períodos de onda mais elevados.

Estes resultados são tanto mais importantes quanto o facto de os movimentos no plano horizontal serem os que mais influência têm nas condições de operacionalidade e de segurança num terminal de petroleiros, Bruun, 1983.

5.3. Análise e discussão dos resultados

Num estado de agitação irregular caracterizado por uma H_s , considerando válida uma distribuição de alturas de onda de *Rayleigh*, poderemos encontrar ondas individuais com uma altura máxima de 1,7 - 1,8 H_s . A existência destas ondas poderá explicar, parcialmente, as diferenças encontradas aquando da comparação dos resultados dos testes com ondas regulares e irregulares.

No entanto, para alguns movimentos, as diferenças são muito expressivas, e ocorrem para as várias categorias de movimentos consideradas. Assim, com base na rotina de cálculo desenvolvida, procedeu-se à análise espectral das séries temporais dos movimentos do navio amarrado. Os espectros de variância obtidos, para cada um dos modos de oscilação do navio, foram sobrepostos, no mesmo gráfico, aos espectros da agitação incidente.

Como já se referiu anteriormente, a largura da janela espectral está inversamente relacionada com o número de blocos de dados em que cada série temporal de movimento é subdividida. Deste modo, representa um compromisso entre a resolução em frequência do espectro de variância estimado e o grau de irregularidade desse espectro.

Nos testes realizados com agitação irregular, os espectros de variância da agitação marítima foram estimados para uma janela espectral com 512 pontos, recorrendo ao software *HR WaveData*. Para a análise das séries temporais dos movimentos do navio usou-se a rotina desenvolvida em MatLab, e uma janela espectral de 2048 pontos.

Nos testes realizados com agitação regular, os espectros de variância associados aos movimentos do navio foram determinados para uma janela espectral de 4096 pontos. A escolha resulta do facto de, nestes testes, a densidade espectral associada aos movimentos do navio estar muito concentrada em torno de uma única frequência. No caso da agitação marítima, a energia deverá concentra-se, exclusivamente, numa frequência isolada. Em teoria, esta frequência deverá apresentar uma densidade espectral que tende para o infinito.

Quadro 4. Períodos de pico associados aos espectros estimados para os diferentes modos de oscilação do navio (valores de protótipo). Testes realizados com agitação com uma altura de onda de 1,5 m e um período de 16s.

Movimentos do navio	Tnat (s)		
	Ag. Irregular	Ag. Regular	
Horizontais	Avanço	77,6	16,0
	Deriva	77,6	16,0
	Guinada	53,3	16,0
Verticais	Arfagem	16,7	16,0
	Balanço	13,5	16,0
	Cabeceio	17,1	16,0

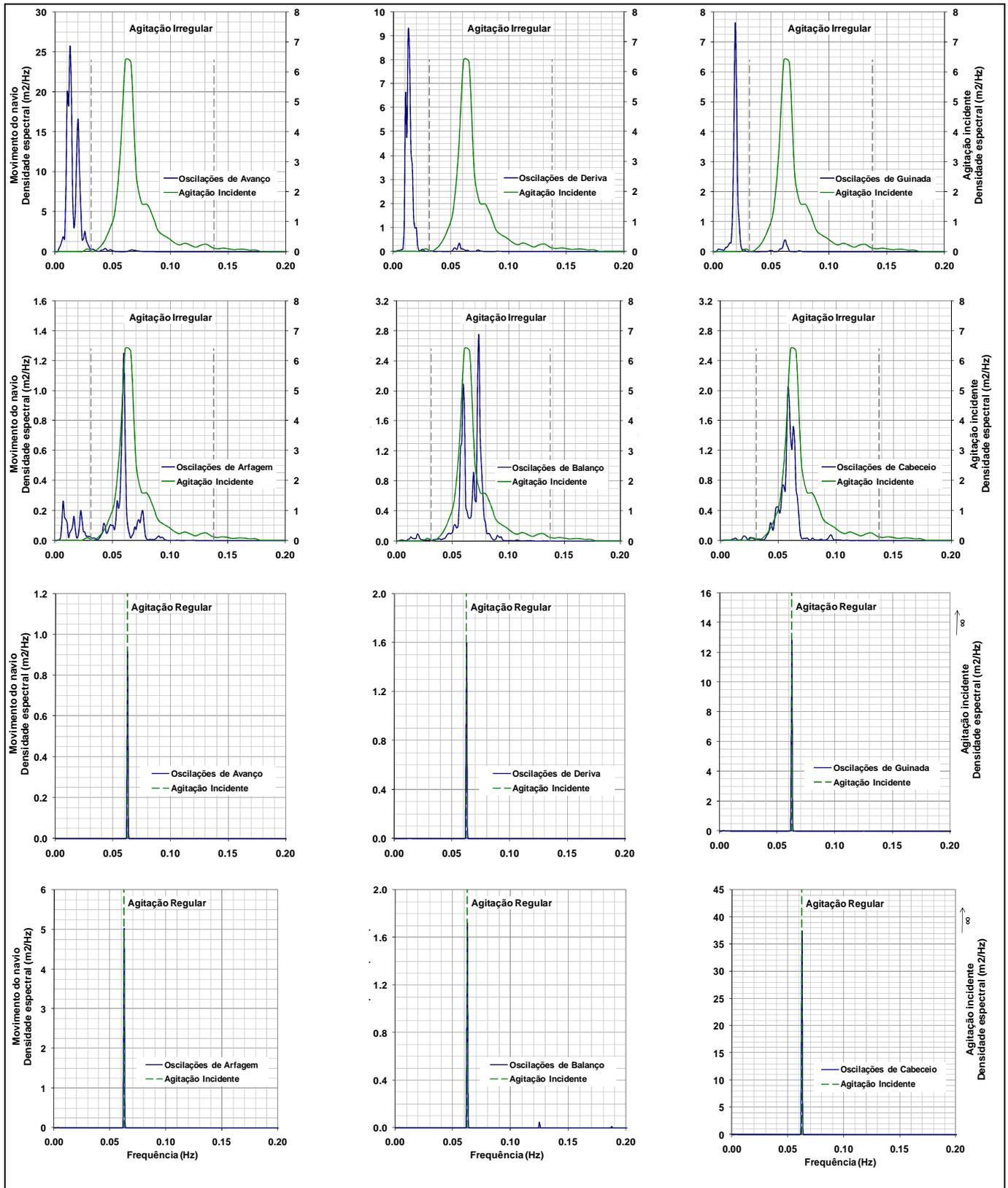


Figura 10. Resultados da análise espectral das séries temporais dos movimentos do navio amarrado e da agitação incidente (no protótipo). Ensaios realizados com agitação regular e irregular, com um período de onda igual a 16 s (T_p , nos testes com agitação irregular), e uma altura de onda igual a 1,5 m (H_s , nos testes com agitação irregular).

A Figura 10 apresenta os espectros de variância para cada um dos modos de oscilação do navio amarrado, que resultam da análise de dois testes; um realizado com agitação regular com uma altura de onda de 1,5 m e com um período de onda de 16 s, o outro com agitação irregular com uma H_s de 1,5 m e um T_p de 16 s.

Analisando os movimentos do navio no plano horizontal (avanço, deriva e guinada) observa-se, nos testes realizados com agitação irregular, a existência de um desfaseamento entre os espectros da agitação incidente e os espectros dos movimentos do navio.

Uma análise mais aprofundada revela que os períodos de pico associados aos espectros desses movimentos do navio, Quadro 4, são claramente superiores aos da agitação incidente ($T_p=16$ s). No entanto, esses períodos de pico estão muito próximos dos períodos naturais de oscilação, determinados experimentalmente para esses modos de oscilação do navio, Quadro 3.

Nos espectros estimados para as oscilações de avanço e de deriva, pode ainda observar-se a existência de picos secundários, com uma densidade espectral não desprezável. Estes picos poderão resultar de uma elevada resolução em frequência do espectro estimado. Os espectros estimados para os movimentos do navio amarrado no plano vertical (arfagem, balanço e cabeceio), contrariamente ao observado nos movimentos no plano horizontal, não se encontram desfasados em relação aos da agitação incidente. Os períodos de pico associados a estes espectros encontram-se na gama de frequências da agitação incidente, e próximos dos períodos naturais de oscilações do navio amarrado.

Os resultados apresentados no Quadro 4 referem-se apenas a testes realizados com agitação com um período de 16 s e uma altura de onda de 1,5 m. A análise dos resultados de outros testes, realizados com outros períodos de onda (não apresentados neste artigo), mostrou que os períodos de pico associados aos espectros de variância dos modos de avanço, deriva, balanço, e guinada, se mantêm sensivelmente inalterados. Os períodos de pico dos espectros estimados para os modos de arfagem e de cabeceio tendem a seguir, de muito perto, os períodos da agitação incidente.

Nos testes realizados com agitação regular, verificou-se que a resposta do navio amarrado, quer no plano horizontal, quer no plano vertical, ocorre, exclusivamente, na frequência da agitação marítima incidente, Figura 10. Consequentemente, os períodos de pico associados aos espectros estimados para os movimentos do navio no plano horizontal são significativamente inferiores aos períodos naturais de oscilação do navio para esses modos de oscilação (Quadro 3 e 4). No plano vertical, existe maior proximidade entre os períodos de pico e os períodos naturais de oscilação. Esta proximidade deverá resultar do facto de o período da agitação marítima se encontrar relativamente próximo dos períodos naturais de oscilação do navio no plano vertical.

As diferenças observadas aquando da análise dos resultados apresentados na Figura 10 podem ser justificadas pelo facto de os movimentos do navio no plano horizontal serem, normalmente, controlados pelos períodos naturais introduzidos pelo sistema de amarração. Como a massa do navio é consideravelmente mais elevada do que a rigidez do sistema de amarração, esses períodos naturais tendem a ser significativamente mais elevados que os períodos característicos da agitação marítima incidente, e, portanto, dificilmente excitáveis por agitação regular, que não possui energia nessa gama de frequências. Assim, nos testes em modelo físico realizados com agitação irregular, o navio amarrado tenderá a experimentar movimentos de maior amplitude, comparativamente às situações em que se utiliza agitação regular.

A maior proximidade entre as amplitudes dos movimentos do navio no plano vertical, nos testes com ondas regulares e irregulares, deverá resultar do facto de estes modos de oscilação apresentarem períodos naturais mais baixos, o que, de certa forma, deverá permitir que possam ser excitados por agitação regular. Dos modos de oscilação verticais, o balanço é aquele que apresenta as maiores diferenças. Este modo de oscilação do navio, apesar de ocorrer no plano vertical, sofre uma influência pequena, mas não desprezável do sistema de amarração.

6. Conclusões

O trabalho apresentado permitiu realçar a importância de reproduzir o carácter irregular da agitação marítima nos testes em modelo físico em que se pretende avaliar o comportamento de navios amarrados em portos.

A utilização de agitação regular conduz a uma significativa subavaliação da resposta do navio no plano horizontal (movimentos de curso, abatimento e guinada). Esta constatação é tanto mais importante pelo facto de os movimentos no plano horizontal serem os que mais influência têm nas condições de operacionalidade e de segurança num terminal de petroleiros.

Os movimentos do navio amarrado no plano horizontal são normalmente controlados pelos períodos naturais introduzidos pelo sistema de amarração. Esses períodos naturais tendem a ser significativamente mais elevados que os períodos característicos da agitação marítima, e não são excitados por agitação regular de curto período.

Agradecimentos

O Projecto DOLPHIN (PTDC/ECM/72835/2006) está a ser financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do programa POCI/FEDER.

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



EU FEDER



Governo da República Portuguesa



Paulo Rosa Santos agradece à FCT a sua bolsa de doutoramento. Os autores estão também gratos à APDL - Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A., pelo apoio concedido para a realização deste trabalho, e ao INETI-IST pelo empréstimo do sistema de medição de movimentos *Qualisys – Motion Capture System*.

Referências

- Bruun, P. (1983). Mooring and fendering rational principles in design. 8th International Haven Congress, June.
- IHRH-FEUP/IST (2005). Estudo sobre as condições de operacionalidade no Terminal Petrolero do Porto de Leixões, 6 Volumes, Porto, Portugal.
- PIANC, 1995. Criteria for movements of moored ships in harbours, a practical guide. WG24 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin PIANC 88, ISBN 2-87223-070-X.

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 Petrolífero do Porto de Leixões: Construção e Calibração do Modelo Físico", 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, 24 de Out. de 2007.

Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F., Silva, R., das Neves, L., Rosa Santos, P., Guedes Lopes, H., (2007). "O Novo Sistema de Geração e Aquisição de Agitação Marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP", 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, 24 de Out. de 2007.

Veloso-Gomes F., Taveira-Pinto F., Rosa-Santos P., Brógueira-Dias E. & Guedes-Lopes H. (2005). Berthing characteristics and the behavior of the oil terminal of Leixões Harbour, Portugal, Marine Heritage and Modern Ports, WIT Press, ISBN: 1 -84564-010-1. pp 481-492.