ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE NAVIOS DO TIPO PETROLEIRO AMARRADOS NO INTERIOR DE UM PORTO

F. Taveira Pinto¹, F. Veloso Gomes², P. Rosa Santos³, C. Guedes Soares⁴, N. Fonseca⁵, A. Paço⁶, J. Alfredo Santos⁷, A. Paulo Moreira⁸, P. Costa⁹, P. Malheiros¹⁰ e E. Brógueira Dias¹¹

^{1, 2, 3} Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

> ^{4, 5, 6} Centro de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

⁷ Departamento de Hidráulica e Ambiente – LNEC, Lisboa, Portugal.

^{8, 9 e 10} Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, ISR-Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

¹¹ Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A., APDL, Porto, Portugal.

Resumo

O projecto de I&D DOLPHIN, pretende estudar o comportamento de navios amarrados no interior de portos, e tem como caso de estudo o Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Este artigo apresenta alguns dos desenvolvimentos verificados até ao momento nas diferentes vertentes do projecto, nomeadamente: modelação física, modelação numérica e desenvolvimento de equipamento para a realização de medições em protótipo.

Ao nível da modelação física é dado destaque às fases de construção e calibração do modelo físico, e aos resultados já obtidos para algumas das condições testadas. As fases seguintes do estudo serão também apresentadas sumariamente.

Os progressos ao nível do desenvolvimento dos dois modelos numéricos para a simulação do comportamento de navios amarrados em portos são também apresentados, fazendo-se referência às verificações intermédias de um deles, e à simulação do comportamento de um navio amarrado em zona exposta (sem obra de abrigo) no outro.

Por fim, será feita referência ao sistema de visão estereoscópica que se encontra a ser desenvolvido com o objectivo de medir os movimentos de um navio amarrado no Posto "A" do Porto de Leixões. Os resultados dos testes preliminares desse equipamento, em ambiente laboratorial, são também apresentados.

1 Introdução

Com o aumento do volume de trocas comerciais realizadas por via marítima, tornase cada vez mais importante dotar os portos de terminais seguros e eficientes, contribuindo para o aumento da sua competitividade e rentabilidade. A necessidade de minimização de custos operacionais e dos riscos ambientais e de segurança associados, quer à manobra de navios em portos, quer ao seu comportamento quando amarrados a estruturas de acostagem, justificam um esforço de investigação continuado no sentido de melhor se compreender toda a dinâmica do sistema navio – estrutura de acostagem – defensas – cabos de amarração.

Neste contexto, e perante a complexidade que a problemática do comportamento de navios amarrados em portos tem subjacente, é fundamental recorrer a metodologias de estudo que combinem o uso de ensaios em modelo físico, com simulações numéricas e medições em protótipo (escala real), tirando partido das potenciais sinergias existentes.

O projecto de I&D DOLPHIN, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e pelo Porto de Leixões, teve início em Janeiro de 2008, baseia-se na metodologia anteriormente referida e tem como objectivo estudar o comportamento de navios amarrados no interior de portos, em particular o caso de estudo do Posto A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Este posto de acostagem constitui um caso de estudo com particular interesse, pela sua localização e características, sobre o qual existe muita informação disponível resultante de vários estudos já realizados, envolvendo quer modelação física, IHRH-FEUP/IST (2005), quer modelação numérica, Santos (2005 e 2006).

Este projecto tem como coordenador e responsável pela componente modelação física o Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de modelos numéricos tendo em vista a simulação do comportamento de navios amarrados em portos são da responsabilidade do Centro de Engenharia e Tecnologia Naval do Instituto Superior Técnico e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O desenvolvimento de um sistema de visão estereoscópica para a medição dos movimentos de navios amarrados no Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões ficou a cargo do Instituto de Sistemas e Robótica do Porto, da FEUP.

Os principais objectivos deste projecto de investigação são:

- Estudar um terminal portuário com alguns problemas operacionais e de segurança;
- Analisar alternativas de intervenção em terminais portuários tendo em vista a melhoria das condições de operacionalidade e de segurança existentes;
- Melhorar o conhecimento e a compreensão das complexas interacções que ocorrem entre o navio, a estrutura de acostagem, o sistema de amarração, as defensas, e as acções do ambiente marítimo e portuário;
- Apresentar contributos inovadores para a concepção e o dimensionamento de estruturas de acostagem e amarração;

• O desenvolvimento, a melhoria e a validação de modelos numéricos, usando resultados de ensaios em modelo físico e, eventualmente, de medições realizadas em protótipo.

2 Caso de Estudo – Terminal Petroleiro do Porto de Leixões

O Porto de Leixões, localizado na costa Oeste portuguesa, na foz do Rio Leça e aproximadamente 4,5 km a Norte da embocadura do Rio Douro, está preparado para receber os principais tipos de tráfego marítimo-portuário. O terminal de petroleiros existente é composto 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 do tipo petroleiro. 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 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 petroleiros de maior porte recorrem usualmente a cabos de amarração em aço com extremidades em fibras sintéticas (nylon ou polietileno).

A estrutura de acostagem propriamente dita 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 pneumáticas e ganchos de amarração duplos. Os restantes pontos de amarração localizam-se ao longo da superstrutura 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 por vezes ocorrer no Posto "A" problemas hidrodinâmicos e operacionais. Nas situações mais críticas os navios aí amarrados podem apresentar movimentos excessivos (com eventualmente rotura de alguns cabos de amarração), e as operações de carga e descarga do navio amarrado tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis de realizar em condições de segurança, obrigando o navio petroleiro a abandonar o cais e esperar por melhores condições para retomar as operações de movimentação de mercadorias.

O comportamento actual deste posto de acostagem não permite assegurar em média as condições de operacionalidade, de segurança e ambientais durante mais de 20% dos dias, IHRH-FEUP/IST (2005). Adicionalmente, são frequentes as operações de manutenção do manto resistente, em tetrapodes, do quebramar Norte, assim como a realização de operações de dragagem na vizinhança do Posto "A".

A situação apresentada acarreta alguns custos operacionais para a administração do porto bem como riscos ambientais e de segurança que é importante minimizar como forma de melhorar a rentabilidade do terminal, tornando-o um caso de estudo com muito interesse.

As condições de operacionalidade no Posto "A" são supostamente influenciadas pela ocorrência de galgamentos do quebramar Norte, adjacente ao Posto "A", pela difracção das ondas em torno da cabeça do quebramar Norte, pelas características do sistema de amarração do navio e das defensas existentes, pela possível transmissão através do núcleo do quebramar Norte, e por eventuais fenómenos ressonantes na área adjacente ao Posto "A". Uma descrição detalhada sobre as condições operacionais do Posto A" pode ser encontrada em IHRH-FEUP/IST (2005) e Veloso-Gomes *et al.* (2005).

3 Modelação Física

3.1 Fases do Estudo

O estudo em modelo físico do comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões foi subdivido em duas fases, a realizar por ordem crescente de complexidade.

Na primeira fase do estudo utilizou-se um modelo físico simplificado do Posto "A" e área envolvente. Foram apenas reproduzidas no tanque de ondas da FEUP a localização e as características dos duques *d'Alba* de acostagem e de amarração, e as características elásticas do sistema de amarração e das defensas. Como nesta fase se pretendia avaliar o comportamento de um navio amarrado no Posto "A" sob acção directa de ondas de vante, não houve necessidade de reproduzir o quebramar Norte do Porto de Leixões que abriga este posto de acostagem da acção directa da agitação marítima. Os fundos na região adjacente ao quebramar Norte de Leixões foram considerados horizontais, e à cota de -16 m ZHL. Escolheram-se condições de agitação marítima realistas, que tiveram em atenção a localização do Posto"A".

O esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP encontra-se esquematizado na figura 3. Este tanque de ondas possui 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade de 1,2 m.



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

Foram usadas 4 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 pelo navio no local de instalação das sondas. Uma praia foi instalada ao fundo do tanque para reduzir a reflexão da agitação. O modelo físico foi construído de acordo com a semelhança de *Froude*, para uma escala geométrica não distorcida igual a 1/100. O modelo 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 -1^a fase do estudo).

Na segunda fase do estudo (em preparação) será reproduzida no modelo físico a geometria do quebramar Norte 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 O Modelo Físico

O navio do tipo petroleiro seleccionado para o estudo pertence à classe dos navios de maior porte que mais frequentemente utilizam o Posto "A". Este navio, fretado em exclusividade pela *Galp Energia*, tem 105 000 dwt, 245 m de comprimento total e 14,1 m de calado máximo. O primeiro modelo físico do navio foi construído à escala geométrica 1/100, em plástico reforçado com fibra de vidro, a partir dos planos *2D* do navio real, Rosa Santos *et al.* (2007).

Previamente à realização dos testes, o modelo 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, Rosa Santos *et al.* (2007).

O sistema de geração de ondas actualmente instalado no tanque de ondas do LH-FEUP, desenvolvido pela *HR Wallingford*, *U.K.*, é do tipo multi-elementos, e está equipado com um sistema dinâmico de absorção de reflexões, Taveira Pinto *et al.* (2007). 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, 6GL, figura 3.

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. As forças, em cada um destes elementos, foram medidas continuamente com sensores de força.

3.3 Situações já analisadas

Durante a primeira fase do estudo em modelo físico, o comportamento de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões foi estudado para diferentes condições de teste. Neste subcapítulo são apresentados alguns dos resultados e conclusões obtidos.

3.3.1 Importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima

Com o intuito de realçar a importância da reprodução do carácter irregular da agitação marítima nas situações em que se pretender avaliar a resposta de navios amarrados, foram comparados os resultados de ensaios efectuados em modelo físico com agitação regular e irregular. Nos testes analisados o modelo do navio encontrava-se calibrado para a situação de carga máxima e amarrado à estrutura de acostagem com um esquema de amarração ligeiramente assimétrico, figura 2. O layout de implantação do modelo físico no tanque de ondas encontra-se esquematizado na figura 3.

O gráfico apresentado na figura 5 compara a amplitude dos vários movimentos do navio amarrado (valores pico-a-pico) resultantes da análise de testes efectuados com agitação regular e irregular, com um período de onda igual a 20 s (período de onda de pico no caso de agitação irregular, T_p) e com uma altura de onda igual a 1,5 m (altura de onda significativa no caso de agitação irregular, H_s). Para cada um dos seis tipos de movimentos que o navio amarrado pode experimentar, são apresentadas a amplitude máxima (Máx), a amplitude correspondente à média do décimo superior das amplitudes (1/10), a amplitude significativa (Sign) e a amplitude média (Méd).



Figura 5. Amplitudes do movimento do navio amarrado (no protótipo), segundo cada um dos 6GL, resultantes da análise de testes com agitação regular e irregular, com um período de onda igual a 20 s e uma altura de onda igual a 1,5 m.

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. Esta constatação é tanto mais importante 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.

Procedeu-se também à análise espectral das séries temporais dos movimentos do navio amarrado. Os espectros obtidos foram sobrepostos, no mesmo gráfico, aos espectros da agitação incidente. A figura 6 apresenta os resultados correspondentes ao movimento de avanço, que resultam da análise de dois testes realizados com agitação com uma altura de onda de 1,5 m e com um período de onda de 16 s.



Figura 6. Resultados da análise espectral da série temporal do movimento de avanço do navio amarrado e da agitação incidente (no protótipo). Teste efectuado com agitação irregular (esquerda); Teste efectuado com agitação regular (direita).

Verifica-se, no teste efectuado com agitação regular, que a resposta do navio segundo a direcção da oscilação de avanço ocorre exclusivamente na frequência da agitação incidente. Pelo contrário, no teste efectuado com agitação irregular, a frequência de pico do espectro determinado para a oscilação de avanço ($f_{p avanço}=0,0129$ Hz) não coincide com a frequência de pico da agitação irregular incidente ($f_p=0,0625$ Hz), mas coincide com a frequência natural de oscilação de avanço determinada experimentalmente ($f_{nat avanço}=0,0129$ Hz).

As diferenças observadas aquando da análise dos resultados apresentados na figura 5 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 normalmente a massa do navio é consideravelmente mais elevada que a rigidez do sistema de amarração, esses períodos naturais tendem a ser significativamente mais elevados que os períodos característicos da agitação marítima, e portanto dificilmente excitáveis por agitação regular, que não possui energia nessa gama de frequências. Conclui-se assim que nas situações em se pretende avaliar a resposta não-linear de um navio amarrado é essencial reproduzir o carácter irregular da agitação marítima.

3.3.2 Efeito da pré-tensão no comportamento do navio amarrado

Com o objectivo de analisar o efeito de um aumento da pré-tensão nos traveses no comportamento de um navio amarrado no Posto "A", voltou a recorrer-se ao modelo físico simplificado do Posto "A" e área envolvente, figura 3. Foram realizados testes com agitação irregular para duas situações: condição base, que corresponde a tensões iniciais em todos os cabos de amarração da ordem das 10 t a 12 t; e condição de pré-tensão extra, na qual, partindo da condição base, a tensão inicial nos traveses do navio foi aumentada para um valor compreendido entre as 25 t e 27 t. Os testes foram realizados com o modelo do navio calibrado para a situação de carga máxima, e amarrado à estrutura de acostagem de acordo com o esquema de amarração da figura 2. A figura 7 apresenta os resultados de testes efectuados com agitação com um período de onda de pico igual a 16 s, uma altura de onda significativa de 1,5 m, e considerando uma profundidade de água junto ao cais igual a 20 m.



Figura 7. Efeito do aumento da pré-tensão nos traveses na amplitude dos movimentos do navio (no protótipo), segundo cada um dos 6GL. Teste efectuado com agitação irregular, com um período de pico de 16 s e uma com uma altura de onda significativa de 1,5 m.

A análise da figura 7 mostra que o aumento da pré-tensão nos traveses é mais eficaz na redução dos movimentos de avanço do navio amarrado, tendo também um efeito favorável na redução dos movimentos de deriva. A influência nos restantes movimentos é muito ligeira. Os resultados obtidos deverão estar relacionados com o facto de um aumento da pré-tensão nos traveses favorecer o contacto do navio com as defensas, permitindo deste modo tirar maior partido das forças de atrito desenvolvidas na interface para a redução da amplitude dos movimentos de avanço.

Apesar de não se apresentarem nesta comunicação os resultados referentes às forças nos cabos de amarração e nas defensas, verificou-se que o aumento da pré-tensão nos traveses conduzia a um aumento das forças máximas nesses cabos de amarração e nas defensas. Verificou-se, no entanto, para condições de agitação não muito energéticas, uma redução das forças máximas nas regeiras, que são usualmente os cabos de amarração com maiores esforços devido essencialmente ao seu menor comprimento. A redução das forças máximas nas regeiras está associada à redução dos movimentos de avanço do navio amarrado.

4 Modelação Numérica

4.1 Comparação entre método dos painéis e teoria das faixas

Existem dois métodos alternativos para resolver o problema hidrodinâmico da interacção entre os navios, ou estruturas flutuantes esbeltas, e as ondas: o método dos painéis e a teoria das faixas. Nesta secção comparam-se as previsões numéricas das amplitudes das funções de transferência para o navio tanque pelos dois métodos. Utiliza-se o código Wamit (Lee and Newman, 2005) para o cálculo pelo método dos painéis e um código desenvolvido no Centec e baseado na teoria de Salvesen *et al.* (1970). A vantagem da teoria das faixas é a facilidade com que representa os efeitos da velocidade do navio, o que no presente caso de estudo não é relevante.

Não se entra em detalhes das formulações, no entanto interessa referir que ambos os métodos são lineares, o método dos painéis considera o escoamento tri-dimensional (3D) em torno do casco, enquanto a teoria das faixas assume que o escoamento é bidimensional (2D) em cada secção transversal do casco. Dito de outro modo, o método dos painéis resolve o problema de condição fronteira assumindo a equação de Laplace, e as condições de fronteira na superfície livre e no corpo, todas 3D. A teoria das faixas assume que as mesmas condições são 2D. A hipótese da teoria das faixas é tanto mais válida quanto mais esbelto for o casco e maior a frequência das ondas incidentes.

As figuras 8 e 9 mostram exemplos representativos das comparações das funções de transferência dos movimentos (amplitudes) em função da frequência de onda pelos dois métodos em análise. A convenção para a proa relativamente às ondas é de 180° para ondas pela proa. Os movimentos de translação são adimensionalizados pela amplitude da onda incidente (ζ_a) e os angulares pelo declive da onda incidente ($k\zeta_a$), onde *k* é o número de onda.



Figura 8. Amplitudes das funções de transferência dos movimentos horizontais de deriva e guinada (a convenção é 180º para ondas pela proa).

Começando pelos movimentos de deriva e de guinada (figura 8), não se pode dizer que o haja boa concordância entre as previsões dos dois métodos, especialmente para as frequências mais baixas onde o método dos painéis prevê resultados superiores. Acredita-se que os resultados pelo método dos painéis são mais precisos pois os efeitos 3D no escoamento são mais importantes para frequências baixas.

Relativamente aos movimentos verticais (figura 9) o ajustamento entre as previsões pelos dois métodos é em geral boa. A função de transferência em arfagem, para todas as proas relativamente às ondas, resulta sempre em boas comparações entre métodos. O mesmo se pode dizer para o cabeceio, excepto para a gama de frequência muito baixa, onde os resultados da teoria das faixas convergem para os valores correctos (ângulo de cabeceio igual ao declive da onda), enquanto o método dos painéis diverge para valores elevados. Na prática este "problema" do método dos painéis não tem consequência pois ocorre para frequência muito baixas onde os estados do mar reais não têm energia. Finalmente, no caso do balanço considerou-se apenas o amortecimento potencial, embora se saiba que subestima o amortecimento real do navio. Por esta razão a amplificação dinâmica do balanço é irrealisticamente elevada. Aqui o objectivo é comparar métodos numéricos. As previsões são semelhante pelos dois métodos, embora a teoria das faixas resulte num amortecimento em ressonância ligeiramente inferior ao do método dos painéis.



Figura 9. Amplitudes das funções de transferência dos movimentos verticais de arfagem, balanço e cabeceio (a convenção é 180º para ondas pela proa).

Como conclusão, pode-se dizer que ambos os métodos podem ser utilizados para calcular os movimentos verticais do navio tanque sem velocidade. Embora as forças hidrodinâmicas não sejam bem representados para frequências baixas pela teoria das faixas devido aos efeitos 3D que são desprezados, como nesta gama de frequências o problema é dominado por efeitos de restituição e impulsão o resultado final é bom. No entanto é importante ter uma boa previsão do amortecimento potencial. No caso dos movimentos horizontais acredita-se que o método os painéis é mais apropriado, pois neste caso, como não há efeitos de restituição, é importante ter uma boa previsão das forças hidrodinâmicas para frequências baixas. Normalmente, no caso dos navios convencionais com velocidade de avanço, os movimentos verticais são os mais importantes em termos de comportamento no mar. No entanto, no caso do navio tanque amarrado ao cais, os movimentos horizontais são muito importantes logo conclui-se que devem ser utilizados métodos dos painéis.

4.2 O pacote numérico MOORNAV

Utilizando a abordagem de resposta a impulso proposta por Cummins (1962), que implica a linearidade da interacção entre o corpo flutuante e as ondas, é possível escrever as equações de movimento do navio amarrado da seguinte forma

$$\sum_{j=1}^{6} \left[(M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_{j}(t) + \int_{-\infty}^{t} K_{kj}(t-\tau) \dot{x}(\tau) d\tau + C_{kj} x_{j}(t) \right] =$$

= $F_{k}^{d}(t) + F_{k}^{m} + F_{k}^{f}(t) \qquad k = 1,6$ (1)

Em que M_{kj} é a matriz de massas do navio; C_{kj} é a matriz de restituição hidrostática do navio; $K_{kj}(t)$ são as funções de resposta a impulso, m_{kj} é a matriz de massa adicionada para frequência infinita; $F_k^d(t)$, $F_k^m(t)$ e $F_k^f(t)$ são, respectivamente, as forças de excitação devidas às ondas, as forças dos cabos de amarração e as forças das defensas.

Enquanto as matrizes de massa e de restituição hidrostática dependem apenas da geometria do navio e da distribuição de massas no mesmo, as funções de resposta a impulso, a matriz de massa adicionada para frequência infinita e as forças de excitação devidas às ondas dependem da perturbação causada pelo corpo flutuante no escoamento associado à propagação da onda. No pacote numérico MOORNAV (Santos, 1994) estas grandezas são avaliadas através da transformada de Fourier de resultados obtidos no domínio da frequência e da decomposição da interacção do corpo flutuante com as ondas em dois problemas mais simples: o chamado problema de radiação, em que o corpo oscila em águas de outra forma paradas, e o problema de difracção em que o corpo imobilizado é sujeito à acção das ondas. O modelo numérico WAMIT, Korsemeyer *et al.* (1988), desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica do Massachusetts Institute of Technology, resolve as equações integrais para os potenciais do escoamento associados àqueles problemas no domínio da frequência quando o navio está colocado numa região não limitada horizontalmente, determinando os chamados coeficientes de massa adicionada e de

amortecimento do navio livre, respectivamente, $a_{kj}(\omega)$ e $b_{kj}(\omega)$, bem como as

forças de excitação devidas a ondas regulares. O coeficiente de massa adicionada é a amplitude da componente da força exercida pelo fluido no corpo oscilante que está em fase com o movimento do corpo enquanto o coeficiente de amortecimento é a amplitude da componente que está em fase com o a velocidade do corpo. Estes coeficientes podem ter valores negativos quando aquelas componentes estão em oposição ao movimento ou velocidade respectivos.

O modelo numérico HYDRO, Mynett *et al.* (1985) utiliza os coeficientes de amortecimento obtidos para várias frequências para determinar as funções de resposta a impulso

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos(\omega t) d\omega$$
⁽²⁾

Combinando estas funções com os coeficientes de massa adicionada, o mesmo modelo estima os elementos correspondentes da matriz de massas adicionadas para frequência infinita:

$$m_{kj} = a_{kj}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_{0}^{\infty} K_{kj}(t) \sin(\omega t) d\omega$$
(3)

Os esforços nos cabos de amarração e nas defensas são obtidos das relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração: relações força / extensão para os cabos de amarração e relações força / deformação para as defensas. Esta informação, juntamente com as séries temporais das forças exercidas no navio pelas ondas nele incidentes, que se obtêm da sobreposição das forças devidas a cada uma das componentes presentes no estado de agitação incidente no navio, é utilizada pelo modelo numérico BAS, Mynett *et al.* (1985) para avaliar as séries temporais dos esforços nos elementos do sistema de amarração bem como os movimentos do navio segundo cada um dos seus seis graus de liberdade.

4.3 Simulação do comportamento de um navio amarrado no Posto "A"

Para modelar o comportamento do navio amarrado estudado com o modelo físico, assumiu-se que o navio estava amarrado numa situação exposta sem quaisquer paredes reflectoras na proximidade. A superfície molhada do casco do navio foi discretizada com 3732 painéis, como mostrado na figura 10 e utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difracção do navio livre para 76 frequências igualmente espaçadas entre 0.0125 rad/s e 0.95 rad/s. Todos os resultados do modelo numérico apresentados aqui foram obtidos para o navio colocado numa zona com 18 m de profundidade.

O navio, para a situação de carga máxima, foi amarrado como se mostra na figura 2, com os cabos de amarração e defensas já descritas anteriormente. Os esforços iniciais nos elementos do sistema de amarração eram semelhantes aos referidos no capítulo 3.3.2. Tal como anteriormente, o navio foi sujeito à acção de ondas

irregulares de vante com um espectro JONSWAP. No cálculo das forças exercidas pelas ondas no navio considerou-se quer a parcela linear do problema de difracção, quer as forças de deriva de variação lenta.



Figura 10. Painelização utilizada no modelo numérico WAMIT.

O modelo BAS utiliza os resultados do problema de difracção no domínio da frequência, calculados pelo WAMIT, para determinar as forças lineares do problema de difracção. O acréscimo de pressão associado ao levar em conta o termo quadrático da equação de Bernoulli – que é assumido nulo na teoria de difracção linearizada – dá origem a uma força de deriva média actuante no navio se a onda que nele incide é regular.

Forças de deriva de variação lenta são efeitos de segunda ordem que aparecem quando as ondas incidentes no navio não são monocromáticas. Por exemplo, quando a onda incidente tem duas frequências diferentes, o acréscimo de pressão dá origem, para além das forças de deriva médias correspondentes a cada frequência, a uma força oscilatória com a frequência igual à soma das frequências e a outra força cuja frequência é igual à diferença das mesmas frequências. Esta última é a força de deriva de variação lenta. Esta força é importante porque a diferença de frequências pode ser muito próxima da frequência de ressonância do navio amarrado e, por isso, movimentos de grande amplitude do navio podem ocorrer em situações de mar quase calmo. A função de transferência quadrática apresentada em Newman (1974) é utilizada pelo BAS para calcular as forças de deriva de variação lenta. Esta função combina as forças de deriva de um par de frequências para fornecer a amplitude da força de deriva de variação lenta cuja frequência é igual à diferença das frequências consideradas.

Qualquer que fosse o período de pico da agitação incidente, a duração da simulação foi 4000 s e os valores apresentados nas tabelas seguintes foram obtidos nos últimos 1000 s de simulação.

Para analisar a importância da consideração das forças de deriva de variação lenta no comportamento do navio amarrado foram efectuadas simulações numéricas, com o pacote MOORNAV, em que apenas as forças resultante parcela linear do problema da difracção foram consideradas, e em que quer a parcela linear quer a componente de segunda ordem foram simuladas, tabela 1. Este exercício mostrou a importância nos resultados da forma como é simulada a agitação incidente no navio. Os resultados apresentados na tabela 1 mostram um aumento significativo nas amplitudes das oscilações segundo o avanço e a deriva quando as forças de deriva de variação lenta são incluídas. Esta é uma consequência da utilização de um espectro empírico na caracterização da agitação incidente no navio em vez da série temporal com as ondas que realmente incidiram no navio.

Tabela 1. Evolução, com o período de pico da agitação incidente, do valor significativo da amplitude da oscilação segundo cada um dos 6GL. Ondas irregulares com altura significativa de 2 m. Pré-tensão nos cabos de amarração correspondente à condição base. Forças de difracção apenas (1). Forças de deriva de variação lenta e forças de difracção (2).

Período de	Avanço (m)		Deriva (m)		Arfagem (m)		Balanço (°)		Cabeceio (°)		Guinada (°)	
Pico (s)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
10	0.19	0.55	0.03	0.20	0.12	0.13	0.01	0.02	0.28	0.28	0.22	0.29
12	0.33	0.89	0.03	0.43	0.28	0.28	0.01	0.05	0.34	0.34	0.22	0.55
14	0.50	2.47	0.03	0.76	0.46	0.47	0.02	0.09	0.53	0.54	0.20	0.64
16	0.73	3.54	0.04	0.73	0.43	0.46	0.02	0.11	0.86	0.88	0.20	0.86
18	1.30	5.31	0.05	0.88	0.49	0.55	0.04	0.23	1.30	1.34	0.13	1.21

A tabela 2 compara os resultados das simulações numéricas efectuadas para duas condições pré-tensão nos cabos de amarração: condição base, que corresponde a tensões iniciais em todos os cabos de amarração da ordem das 10 t a 12 t; e condição de pré-tensão extra, na qual, partindo da condição base, a tensão inicial nos traveses do navio foi aumentada para um valor compreendido entre as 25 t e 27 t.

Tabela 2. Evolução, com o período de pico da agitação incidente, do valor significativo da amplitude da oscilação segundo cada um dos 6GL.Ondas irregulares com altura significativa de 2 m. Forças de deriva de variação lenta e forças de difracção. Pré-tensão nos cabos de amarração correspondente à condição base (1) e pré-tensão adicional nos traveses (2).

Período de	Avanço (m)		Deriva (m)		Arfagem (m)		Balanço (°)		Cabeceio (°)		Guinada (°)	
Pico (s)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
10	0.55	0.44	0.20	0.16	0.13	0.13	0.02	0.02	0.28	0.28	0.29	0.24
12	0.89	0.80	0.43	0.40	0.28	0.30	0.05	0.00	0.34	0.30	0.55	0.40
14	2.47	1.76	0.76	0.84	0.47	0.47	0.09	0.07	0.54	0.54	0.64	0.48
16	3.54	2.78	0.73	0.75	0.46	0.46	0.11	0.09	0.88	0.88	0.86	0.36
18	5.31	4.59	0.88	0.87	0.55	0.55	0.23	0.19	1.34	1.34	1.21	0.36

Importa referir que, a pré-tensão adicional nos traveses implica uma redução no valor significativo da amplitude das oscilações segundo o modo de avanço, o que está de acordo com o observado nos ensaios em modelo físico. Embora os valores do modelo numérico não sejam coincidentes com os do modelo físico, a evolução, com o período de pico, dos valores significativos das amplitudes das oscilações e dos esforços máximos nos elementos do sistema de amarração obtidos com o modelo numérico são semelhantes aos do modelo físico. Esta afirmação é válida,

quer para a amarração com a pré-tensão normal em todas os cabos de amarração, quer para a amarração em que os traveses têm uma pré-tensão adicional.

5 Sistema de Visão Estereoscópica

Com o intuito de efectuar medições dos movimentos de um navio amarrado no Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões foi desenvolvido um sistema de detecção de movimento – sistema de visão estereoscópica (SVE). Este sistema é robusto e capaz de medir os movimentos segundo seis graus de liberdade sem necessidade de contacto com o navio.

Para validar a tecnologia o sistema desenvolvido foi testado em laboratório, usando duas câmaras para registar a posição do modelo do navio de diferentes perspectivas, figura 11, para que fosse possível triangular a sua posição e orientação.



Figura 11. Imagens estereoscópicas do modelo do navio com marcadores processados.

Foram colocados no modelo do navio dois marcadores com um padrão tipo dado, utilizados para fazer a correspondência entre as duas imagens. Inicialmente foi necessário determinar a geometria do sistema composto pelas duas câmaras, sendo este representado pela Matriz Fundamental. Esta matriz relaciona coordenadas de pixéis de um dado ponto entre imagens estereoscópicas, e para a sua estimação utilizou-se o *Normalized Eight Point Algorithm*, Hartley (1997). Tendo esta matriz determinada é possível relacionar as câmaras através das suas Matrizes de Projecção (rotação e translação) que permitem a reconstrução tridimensional desejada.

O sistema a instalar no Posto "A" será baseado na tecnologia apresentada e composto por dois pares de câmaras, estando um par orientado para a proa do navio e o outro para a popa. A utilização de apenas um par de câmaras no Posto "A" não permitiria a detecção correcta dos movimentos do navio, uma vez que não é possível colocar as câmaras a uma distância significativa como testado no modelo físico.

5.1.1 <u>Resultados e Discussão</u>

Os resultados obtidos com o SVE desenvolvido são apresentados em comparação com os resultados obtidos com o sistema *Qualisys – Motion Capture System* (QS) na figura 12. Os resultados do SVE (linha azul) são apresentados ainda sem filtragem, ao contrário dos resultados do QS (linha vermelha) que são filtrados. Para melhor visualização, os gráficos foram deslocados verticalmente.



Figura 12. Amostra temporal dos 6GL do modelo físico num teste com Hs=1,5 m, Tp=14 s, para a condição pré-tensão extra. Resultados SVE na linha superior e QS na linha inferior.

Verifica-se que as medições do SVE seguem correctamente as medições obtidas com o sistema QS. A amplitude máxima (Máx) e significativa (Sign) dos movimentos do navio amarrado medidas com o SVE, durante dois testes no modelo físico, são apresentados na tabela 3, assim como as diferenças (Dif) entre estas medidas e as obtidas com o QS.

Hs (m) T (s)		d (m)	Condição	Categoria de movimento	Amplitude dos movimentos do navio amarrado											
	T (s)				Avanço		Deriva		Arfagem		Balanço		Cabeceio		Guinada	
					m	Diff	m	Diff	m	Diff	deg	Diff	deg	Diff	deg	Diff
2.0	2.0 10	10	Darí tamaña	Máx	2.45	-0.7%	1.13	11.6%	0.37	0.8%	0.97	29.8%	0.47	2.4%	0.77	3.5%
2.0 10	10	Tre-tensao	Sign	1.09	-2.1%	0.45	-10.6%	0.24	3.3%	0.57	34.0%	0.30	0.0%	0.36	-9.7%	
1.5	1.5 14	20	D () ~	Máx	1.79	0.1%	1.10	-2.4%	0.60	2.2%	1.46	21.0%	0.83	-0.5%	0.68	3.8%
1.5 14	20	Pre-tensao	Sign	0.73	-2.5%	0.47	-8.0%	0.34	4.1%	0.75	19.3%	0.45	0.2%	0.30	1.4%	

Tabela 3. Comparação dos resultados obtidos com o SVE e com o QS.

Os resultados obtidos para o balanço com o SVE desenvolvido mostraram ser um pouco diferentes dos resultados do QS. Isto deveu-se ao facto de os marcadores colocados no modelo do navio não se encontrarem na posição mais favorável para a medição destes movimentos, pois encontravam-se praticamente sobre o eixo de balanço. No entanto, foi possível seguir correctamente a direcção deste movimento, como se pode verificar na figura 12.

A utilização de um terceiro marcador colocado num plano superior ao utilizado deverá melhorar os resultados obtidos para o movimento de balanço, assim como para o movimento de deriva. As direcções de movimento para as quais se obtiveram os melhores resultados foram o avanço e o cabeceio, tendo-se obtido diferenças inferiores a 1% na maior parte dos testes.

6 Considerações Finais

Uma metodologia para o estudo do comportamento de navios amarrados em portos, e que serve de base ao projecto de I&D DOLPHIN, foi apresentada. Esta metodologia envolve o uso de testes em modelo físico, simulações numéricas e medições em protótipo.

Realçou-se a importância do uso de agitação irregular nos testes em modelo físico em que se pretende avaliar a resposta de navios amarrados em portos, e concluiu-se que um aumento da pré-tensão nos traveses pode contribuir significativamente para a redução da amplitude dos movimentos de avanço de um navio amarrado, tendo também um efeito favorável na redução dos movimentos de deriva.

A comparação dos resultados obtidos por dois métodos para a simulação numérica da interacção hidrodinâmica navio – ondas revelou que os métodos do tipo painel são os mais adequados para a simulação do comportamento de um navio amarrado num porto.

Os resultados obtidos com o pacote numérico MOORNAV mostram uma evolução da amplitude significativa do movimento do navio amarrado com o período de onda semelhante à observada nos testes em modelo físico. No entanto, algumas diferenças entre as previsões obtidas pelos dois modelos (numérico e físico), em termos absolutos, requerem ainda a realização de pequenos melhoramentos no referido pacote numérico. Evidenciou-se a importância da consideração das forças de deriva de variação lenta nas simulações em modelo numérico, e concluiu-se que um aumento da pré-tensão nos traveses se traduz numa redução da amplitude dos movimentos de avanço do navio amarrado.

Um sistema de visão estereoscópica para medição dos movimentos de navios amarrados em protótipo (à escala real) foi desenvolvido e testado em laboratório. Os resultados dos testes do equipamento mostram boa concordância com os resultados obtidos com um sistema comercial (*Qualisys-Motion Capture System*).

Agradecimentos

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



Paulo Rosa Santos e Paulo Malheiros agradecem à FCT as suas bolsas 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

Cummins, W. E., (1962), "Impulse response function and ship motions", Schiffstechnik, 9, 101-109.

Hartley, R.I., (1997), "In Defense of the Eight-Point Algorithm", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, Vol.19, ISSN 0162-8828.

IHRH-FEUP/IST, (2005), "Estudo sobre as condições de operacionalidade no Terminal Petroleiro do Porto de Leixões", 6 Volumes, Porto, Portugal.

Korsemeyer, F. T., Lee, C.-H., Newman, J. N., Sclavounos, P. D., (1988), "The analysis of wave effects on tension-leg platforms", 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, pp. 1-14.

Lee, C.-H., Newman, J.N., (2005), "Computation of Wave Effects Using the Panel Method", in Numerical Models in Fluid-Structure Interaction, S. Chakrabarti, Ed., WIT Press.

Mynett, A. E., Keunig, P. J., Vis, F. C., (1985), "The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration", Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.

Newman, J.N., (1974), "Second order, slowly varying forces on vessels on irregular waves", Proc. Internacional Symposium on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, pp. 182-186.

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, FEUP, 24 de Out. de 2007.

Salvesen, N., Tuck, E. O., and Faltinsen, O., (1970), "Ship motions and sea loads", Transactions Society Naval Architects Marine Engineers, Vol. 78, pp 250-287.

Santos, J. A., (1994), "Numerical Model for the Behaviour of Moored Ships". Report 3/94-B Project NATO PO-WAVES, IH-LNEC, Lisboa.

Santos, J. A. (2005), "Porto de Leixões – Modelação Numérica do Comportamento de Navio Amarrado ao Posto A", Relatório LNEC.

Santos, J. A., (2006), "Porto de Leixões – Comportamento de navio amarrado ao Posto A. Estudos adicionais com modelação numérica", Relatório LNEC.

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", 2ªs 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 behaviour of the oil terminal of Leixões Harbour, Portugal", Marine Heritage and Modern Ports, WIT Press, ISBN: 1-84564-010-1. pp 481-492.