

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM NAVIO AMARRADO NO POSTO "A" DO TERMINAL PETROLEIRO DO PORTO DE LEIXÕES: CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO FÍSICO

## Physical model study of the behavior of a moored ship at the berth "A" Leixões Oil Terminal: Construction and calibration of the physical model

P. ROSA SANTOS <sup>(1)</sup>, F. VELOSO GOMES <sup>(2)</sup>, F. TAVEIRA PINTO <sup>(3)</sup> & E. BRÓGUEIRA DIAS <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Estudante de Doutoramento, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, [pjrs@fe.up.pt](mailto:pjrs@fe.up.pt)

<sup>(2)</sup> Professor Catedrático, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, [vgomes@fe.up.pt](mailto:vgomes@fe.up.pt)

<sup>(3)</sup> Professor Associado, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, [fpinto@fe.up.pt](mailto:fpinto@fe.up.pt)

<sup>(4)</sup> Administrador dos Portos do Douro e Leixões S.A., APDL,  
Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, [brogueira.dias@apdl.pt](mailto:brogueira.dias@apdl.pt)

### Resumo

O comportamento de navios amarrados, e por conseguinte, as condições de operacionalidade e de segurança num dado terminal portuário, não apresenta uma relação simples e directa com as condições ambientais locais. Dada a diversidade e a complexidade dos fenómenos hidrodinâmicos envolvidos, a modelação física é uma ferramenta fundamental para o estudo deste tipo de problemas. Após uma caracterização do Terminal Petrolífero do Porto de Leixões faz-se uma descrição sumária dos principais problemas que afectam as condições de operacionalidade e de segurança no Posto "A". Com a componente experimental do estudo na sua fase inicial, será dado especial destaque à construção do modelo físico (incluindo os dispositivos de acostagem e amarração, o modelo do navio petrolífero, e a estrutura de acostagem) e aos ensaios de calibração do mesmo. Será também feita referência às técnicas de experimentação e aos objectivos das fases que compõem o estudo em modelo físico.

**Palavras-chave:** Condições de Operacionalidade, Estruturas de Acostagem e Amarração, Testes de Calibração.

### Abstract

Moored ship behavior inside harbors, and therefore the operational and security conditions at a port terminal, does not have a straightforward relationship with the local environmental conditions. Due to the diversity and complexity of the involved phenomena, physical modeling is an essential tool to deal with this kind of issues. After the presentation of the Leixões Oil Terminal, a brief description of the main problems affecting operational and security conditions at the berth "A" is carried out. Being the experimental component of the study in its initial phase, special attention is given to the construction of the physical model (including the berthing and mooring devices, the tanker model and the berthing structure) and its calibration tests. Reference is also made to experimental techniques and to the phases that compose the physical model study.

**Keywords:** Operational Conditions, Berthing and Mooring Structures, Calibration Tests.

### 1. Introdução

As condições de operacionalidade e de segurança num terminal portuário estão intimamente relacionadas com o comportamento dos navios amarrados ao cais, nomeadamente com a amplitude dos movimentos do navio e com o valor dos esforços nos cabos de amarração e nas defensas.

Um navio amarrado está submetido a diferentes tipos de acções externas, que interagem com o navio, levando-o a movimentar-se no cais. O comportamento de navios amarrados não apresenta portanto uma relação simples com as alturas de onda da agitação incidente, dependendo

de muitos factores, tais como, o período da agitação incidente, os grupos de ondas, a direcção da agitação relativamente ao cais, as características dos navios amarrados e da estrutura de acostagem, as características elásticas dos cabos de amarração e das defensas, entre outros. Dada a diversidade e a complexidade dos fenómenos hidrodinâmicos envolvidos, a modelação física constitui uma ferramenta fundamental para o estudo do comportamento de navios amarrados.

Os custos operacionais e os riscos ambientais e de segurança associados à manobra de navios em portos e 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.

O Posto "A" do Terminal Petrolífero de Porto de Leixões constitui um caso de estudo com particular interesse, pela sua localização e características, sobre o qual existe muita informação disponível que resulta dos vários estudos já realizados, envolvendo quer modelação física quer modelação numérica.

## 2. Terminal Petrolífero e Terminal Oceânico 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 lidar com os principais tipos de tráfego marítimo-portuário. Dois quebra-mares proporcionam condições de abrigo a este porto marítimo artificial, que é a segunda maior infraestrutura portuária do país.

Na costa Oeste portuguesa o clima de agitação é muito energético, com os princípios temporais a serem gerados no Atlântico Norte, sobretudo entre os meses de Outubro a Março. A altura de onda significativa,  $H_s$ , mais frequente está contida no intervalo de 2 a 3 m. No entanto, durante um temporal a  $H_s$  pode exceder os 8 m. Os períodos de onda mais frequentes estão contidos no intervalo de 8 a 12 s, atingindo 16 a 18 s durante tempestades. A agitação marítima dominante é proveniente dos rumos noroeste e Oeste, com algumas ocorrências de sudoeste. As marés são do tipo semi-diurno, com amplitudes compreendidas entre os 2 e 4 m.

Entre os diversos terminais existentes, destaca-se o Terminal Petrolífero, concessionado à *Galp Energia*, que se encontra ligado por condutas à refinaria de Leça da Palmeira, localizada nas proximidades, Figura 1. Este terminal é composto por três postos de acostagem. O Posto "A", localizado na entrada do porto, encontra-se protegido por um quebra-mar que foi inicialmente projectado e construído como uma estrutura submersa (1940), mas que mais tarde foi transformado num quebra-mar de taludes (1969). 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.

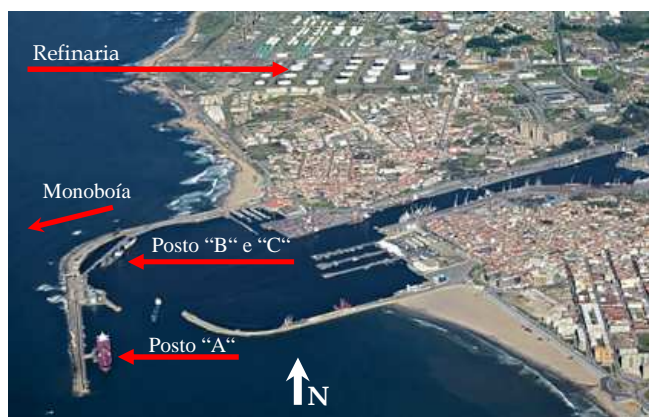


Figura 1. Vista aérea do Porto de Leixões.

Na bacia de manobra associada ao Posto "A" os fundos são mantidos sensivelmente à cota -16 m (ZHL), o que permite a acostagem de navios do tipo petrolífero com um peso bruto máximo de cerca de 100000 t. Os fundos de serviço disponíveis junto aos postos "B" e "C" são mais reduzidos, e encontram-se sensivelmente a -10 m (ZHL) e -6 m (ZHL), respectivamente.

Desde Agosto de 2006 encontra-se em funcionamento ao largo do Porto de Leixões um sistema do tipo monoboia, que procura proporcionar condições de descarga alternativas para a classe dos maiores navios que demandam a Leixões, durante condições marítimas adversas. Este tipo de sistemas permite que o navio amarrado possa rodar livremente, em torno do corpo cilíndrico central, orientando-se de acordo com a resultante das acções exteriores nomeadamente, agitação, vento e correntes.

A monoboia, também designada por Terminal Oceânico de Leixões, permite a recepção de navios do tipo petrolífero até 150000 t de peso bruto e com 17 m de calado máximo. O sistema está localizado numa zona com fundos a cerca de -28,5 m (ZHL), e permite apenas a realização de operações de descarga de crude. Durante o período de tempo que o navio petrolífero permanece amarrado à monoboia é necessário o auxílio permanente de pelo menos um rebocador, Figura 2. A presença deste rebocador permite exercer uma força à popa do navio, permitindo manter os cabos de amarração que ligam o navio à monoboia em tensão e formando apenas uma catenária ligeira. Deste modo reduz-se a probabilidade de o navio atingir a monoboia.



Figura 2. Navio petrolífero amarrado no Terminal Oceânico de Leixões, auxiliado por um rebocador à popa.

O limite teórico de funcionamento da monoboia é imposto pela máxima força que o sistema pode suportar, e corresponde sensivelmente a um navio de projecto amarrado e submetido a agitação marítima com uma altura significativa de 4,5 m e um período de pico de 14 s. O limite prático está intimamente relacionado com a experiência do "Mestre da Amarração", com os meios disponíveis para assistir o navio amarrado, e com a ocorrência simultânea de outras acções externas (vento, correntes, etc.). Os limites para a realização das operações de amarração do navio petrolífero, que apenas podem ser realizadas durante o dia, são mais limitativos e correspondem usualmente a alturas de onda significativa entre 2,0 e 2,5 m.

Devido às condições marítimas adversas no local e aos movimentos que a monoboia experimenta, o sistema de amarração está a ser afectado por um intenso desgaste. Após menos de dois anos de utilização, o desgaste que o

sistema apresenta é o equivalente a 50% do desgaste esperado para um horizonte de projecto de 20 anos.

Actualmente os maiores navios do tipo petrolero que demandam a Leixões usam o sistema monobóia para descarregar petróleo bruto. Sempre que necessário, o Posto "A" do Terminal Petrolero e o sistema monobóia podem ser usados simultaneamente para dar resposta a necessidades de ponta da refinaria de Leça, ou após longos períodos de condições de mar severas, durante os quais a utilização de ambos os terminais é impossível.

Apesar da flexibilidade dada pela instalação do sistema monobóia, no que diz respeito à descarga de petróleo bruto, o intenso desgaste que o sistema apresenta, e a possibilidade de efectuar operações de carga e descarga de petróleo bruto ou de produtos refinados no Posto "A", justificam um esforço de investigação continuado no sentido de melhorar as condições operacionais actualmente existentes no Posto "A". Esse esforço deverá ser dirigido no sentido de melhor compreender as causas que estão na origem dos problemas operacionais que por vezes ocorrem no Posto "A" e no estudo da adequação e da eficiência de algumas intervenções já propostas e a propor para esse terminal.

### 3. Posto "A" do Terminal Petrolero de Leixões

Este posto de acostagem encontra-se protegido da acção directa da agitação marítima pelo quebramar Norte de Leixões, que possui uma orientação aproximadamente Norte-Sul. Assim, a agitação marítima predominante, com direcções compreendidas entre noroeste e Oeste, pode apenas atingir a zona do Posto "A" após difracção em torno da cabeça do quebramar, enquanto que as ondas com direcção de sudoeste podem chegar directamente a essa zona. No entanto, ondas de sudoeste são menos frequentes e a sua altura de onda significativa é em geral pequena quando comparada com a agitação vinda das direcções mais frequentes.

O quebramar Norte de Leixões, com o coroamento à cota +15 m (ZHL), foi construído sobre um antigo quebramar submerso cujo manto exterior era constituído por blocos paralelepípedicos de 90 t, Figura 3. Por esse motivo as características actuais de permeabilidade do quebramar Norte não são conhecidas com rigor.

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 duplos de amarração. Os restantes pontos de amarração do Posto "A" localizam-se ao longo da superestrutura do quebramar Norte tal como esquematizado na Figura 4, que também apresenta o layout de amarração mais usual para os maiores navios petroleros que usam o Posto "A" do Terminal Petrolero do Porto de Leixões.

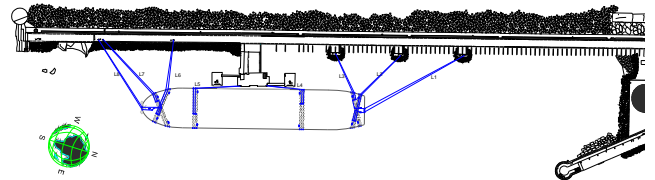


Figura 4. Layout de amarração usual para os maiores petroleros que usam o Posto "A" do Terminal Petrolero de Leixões.

As defensas instaladas têm uma capacidade máxima de absorção de energia de 135 t.m para uma deformação nominal de 55%, à qual está associada uma reacção no duque d'Alba de acostagem e amarração de 250 t (pressão interna do ar de 0.5 kg/cm<sup>2</sup>). Estas defensas flutuantes, da marca YOKOHAMA, tem um comprimento de 6.5 m e um diâmetro de 3.3 m. As características dos cabos de amarração utilizados pelos navios do tipo petrolero que usam o terminal podem variar ligeiramente de navio para navio, mas é frequente o uso de cabos de amarração em aço com extremidades em fibras sintéticas (usualmente nylon).

O Posto "A" pode ser usado por uma variada gama de navios do tipo petrolero. Os maiores navios que normalmente usam o Posto "A" possuem um comprimento total de 250 m, um calado máximo de 14 m, e um deslocamento em carga máxima de cerca de 120000 t.

### 4. Condições de Operacionalidade no Posto "A" do Terminal Petrolero de Leixões

O Posto "A" do Terminal Petrolero, localizado na entrada do porto e paralelamente ao quebramar Norte de Leixões, é aquele que mais exposto se encontra as condições adversas do ambiente marítimo e portuário, Figura 1. Por esse motivo registam-se por vezes nesse posto de acostagem problemas hidrodinâmicos e operacionais. Nessas situações as operações de carga e descarga do navio tornam-se mais difíceis ou até mesmo impossíveis de realizar em condições normais de segurança.

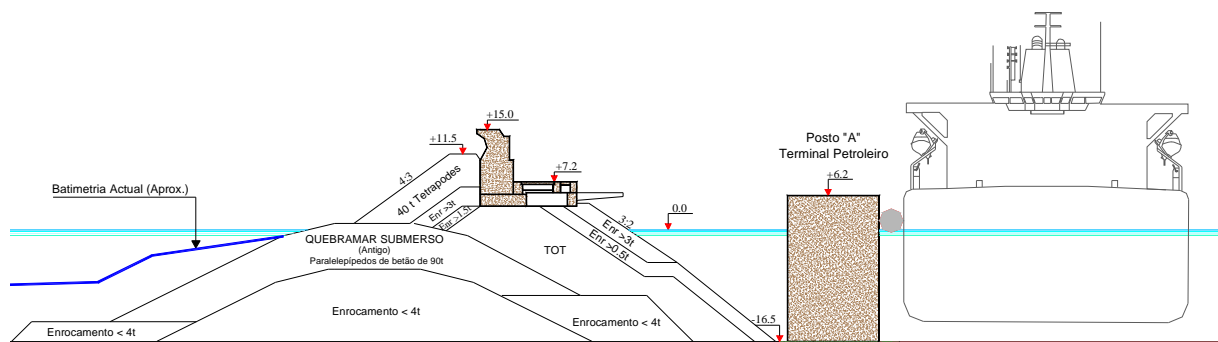


Figura 3. Secção transversal do quebramar Norte do Porto de Leixões adjacente ao Posto "A".



Nas situações mais críticas pode mesmo ocorrer a rotura de cabos de amarração e a experimentação de movimentos excessivos por parte do navio amarrado. Perante este cenário o navio é obrigado a abandonar o cais com o auxílio de rebocadores, e a esperar por melhores condições ambientais para retomar as operações de (des)carga entretanto interrompidas.

A Figura 5, que apresenta uma análise de registos de inoperacionalidade entre 1990 e 2003 (dados fornecidos pela *Galp Energia*), mostra que a percentagem média mensal de inoperacionalidade se situa em cerca de 23%, ocorrendo os picos de inoperacionalidade nos meses de Janeiro e Dezembro (IHRH-FEUP/IST, 2005). É importante referir que neste contexto, inoperacionalidade inclui não apenas os dias nos quais o Posto "A" não pode ser usado devido a condições marítimas adversas, mas também os dias em que foram realizadas operações de manutenção na estrutura de acostagem ou dragagens para manutenção de fundos. Actualmente as condições operacionais existentes são mais favoráveis devido ao esforço de manutenção dos fundos de serviço junto ao posto "A", através da realização de operações regulares de dragagem.

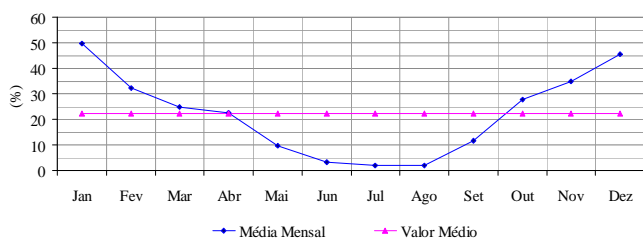


Figura 5. Percentagem mensal de inoperacionalidade do Posto "A" do Terminal Petrolífero de Leixões (IHRH-FEUP/IST, 2005).

O número de situações críticas com navios amarrados no Posto "A" diminuiu após a instalação do sistema monobóia ao largo de Leixões. Para isso contribuiu a flexibilidade que esse sistema veio trazer, no que diz respeito à descarga de petróleo bruto.

Em caso de ocorrência de problemas com navios amarrados no Posto "A", as operações de descarga ou carga são interrompidas, podendo o navio amarrado receber o auxílio de rebocadores com o objectivo de reduzir a amplitude das suas oscilações. Se necessário, são fornecidos cabos de amarração adicionais. Caso os esforços para manter o navio amarrado ao cais em condições de segurança fracassem, este abandona o cais auxiliado por rebocadores. Apesar da utilização de dados de previsões meteorológicas (para 3 a 5 dias) pelos operadores do terminal, problemas com os navios amarrados continuam a ocorrer, ainda que menos frequentemente.

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

## 5. Estudo em Modelo Físico do Comportamento de um Navio Amarrado no Posto "A"

O comportamento de navios amarrados não apresenta uma relação simples com as alturas de onda da agitação incidente, dependendo de muitos factores, tais como: o período da agitação incidente, a presença de grupos de ondas, a direcção da agitação relativamente ao cais, as características dos navios amarrados e da estrutura de acostagem, as características elásticas dos cabos de amarração e das defensas, entre outros (Rita, 1984). A acção do vento, das correntes, das seichas, das marés, bem como os efeitos associados à passagem de navios nas imediações do cais e às operações de movimentação de carga, podem também suscitar a movimentação do navio amarrado.

Dada a diversidade e a complexidade dos fenómenos hidrodinâmicos envolvidos, a modelação física constitui uma ferramenta fundamental para o estudo do comportamento de navios amarrados. O ambiente laboratorial proporciona condições de teste "controláveis" e adaptáveis pelo investigador.

As condições actualmente existentes no Posto "A" são responsáveis por alguns custos operacionais, bem como por riscos ambientais e de segurança, que é importante minimizar como forma de melhorar a sua rentabilidade. Aqui reside a importância do estudo em desenvolvimento.

### 5.1 Fases do Estudo em Modelo Físico

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

A primeira fase do estudo constitui uma abordagem inicial ao problema, e visa a calibração dos vários sistemas de medição e do próprio modelo físico, incluindo o navio do tipo petrolífero. Esta fase inclui a criação de rotinas de ensaio, tratamento e análise de dados, tendo em vista a sua aplicação na segunda fase do estudo. Nesta fase apenas são reproduzidas no tanque de ondas a localização e as características dos duques d'Alba de acostagem e de amarração, e as características do sistema de amarração e das defensas. Os fundos na região adjacente ao quebramar Norte de Leixões foram considerados horizontais. O esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LH-FEUP) encontra-se esquematizado na Figura 6.

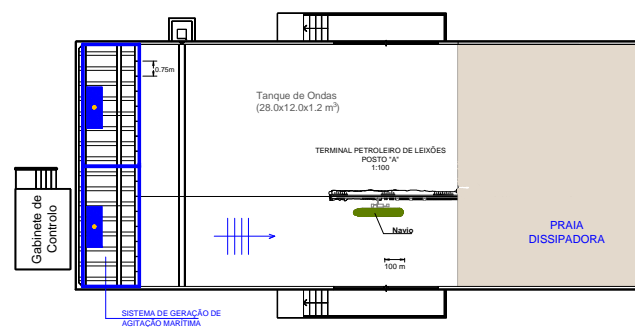


Figura 6. Esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas: primeira fase do estudo.

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 do tipo petroleiro, depois de calibrado, foi amarrado à estrutura de acostagem e de amarração já instrumentada e calibrada, Figura 7. O comportamento do navio encontra-se a ser estudado para condições de agitação marítima regular e irregular.

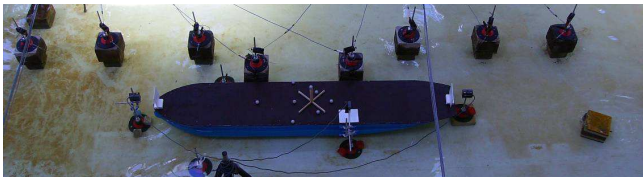


Figura 7. Modelo físico do navio do tipo petroleiro amarrado à estrutura de acostagem e amarração simplificada.

Na segunda fase do estudo será reproduzida no tanque de ondas, à escala 1:100, a região assinalada na Figura 8. Nesta fase será reconstituída 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. Os fundos no modelo físico serão também considerados como sendo horizontais.



Figura 8. Fotografia aérea vertical do Terminal Petrolero do Porto de Leixões, com delimitação da região a reproduzir no modelo físico na segunda fase do estudo (esquerda); fotografia da cabeça do quebramar Norte de Leixões (direita).

O esquema provisório de implantação do modelo físico no tanque de ondas está representado na Figura 9.

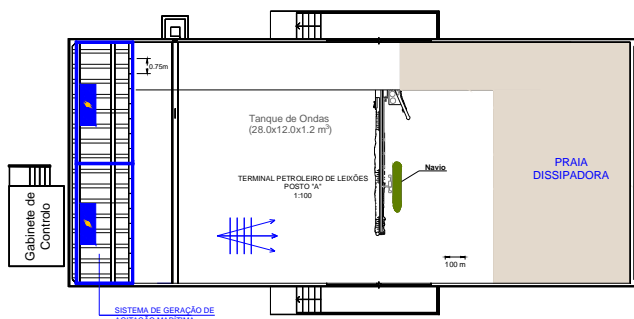


Figura 9. Esquema de implantação do modelo físico no tanque de ondas: segunda fase do estudo.

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 alguns efeitos de escala.

## 5.2 Modelo Físico do Navio do Tipo Petroleiro

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 105000 dwt, 245 m de comprimento total e 14,1 m de calado máximo.

O primeiro modelo do navio foi construído à escala geométrica 1:100, em plástico reforçado com fibra de vidro (*PRFV*), no *INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*, a partir dos planos 2D do navio real. A construção do modelo incluiu a sequência de operações apresentada na Figura 10: digitalização dos planos 2D do casco do navio real, geração do modelo digital 3D do casco, construção das várias peças de geometria complexa usando a técnica de prototipagem rápida – *LOM*, a construção do molde do casco em *PRFV*, e por fim, a construção do modelo reduzido do navio (*PRFV*) e o ajuste final do convés em madeira ao casco do navio.

A utilização da técnica de *LOM* justifica-se pela complexidade das geometrias da popa e da proa do navio. Para dar mais rigidez à peça final fabricada foi necessário reforçar algumas zonas localizadas do modelo com espuma de *PCV*. A reprodução precisa da forma do casco do navio é fundamental para que as forças hidrodinâmicas sejam correctamente reproduzidas no modelo, e de acordo com a semelhança de *Froude*.

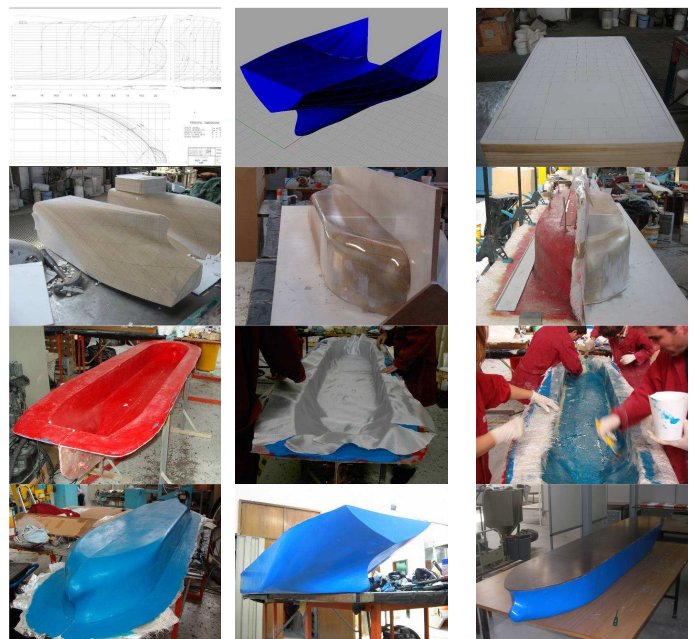


Figura 10. Sequência de operações para a construção do modelo físico do navio do tipo petroleiro, em *PRFV*, à escala 1:100.

No interior do modelo foram colocados travamentos para evitar o encurvamento transversal do casco do navio. O convés superior, materializado por uma placa de contraplacado marítimo, permite esconder os pesos de lastro colocados no interior do modelo físico, e fixar os pontos de amarração. A superestrutura do navio não foi reproduzida. O posicionamento dos pontos de amarração no convés superior do navio está esquematizado na Figura 11.



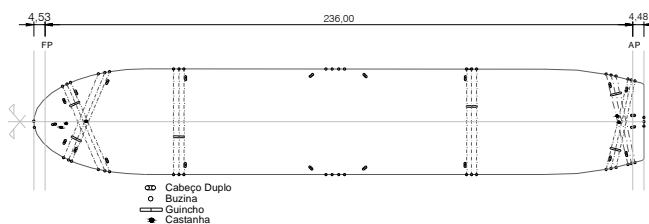


Figura 11. Esquemática do posicionamento dos pontos de amarração no convés superior do navio do tipo petroleiro.

### 5.3 Equipamentos Laboratoriais

O gerador de ondas actualmente instalado no tanque de ondas do LH-FEUP é do tipo multi-elementos, possui 12 m de largura (largura total do tanque de ondas), e é composto por 16 pás que se podem movimentar independentemente, permitindo trabalhar com uma altura de água até 1 m. Este sistema, desenvolvido pela *HR Wallingford, U.K.*, permite a geração de diferentes tipos de agitação marítima, nomeadamente: geração de agitação marítima irregular de crista longa a 2D e de crista curta a 3D, com diferentes ângulos relativamente ao gerador; estados de agitação bi-direccionais, regulares e irregulares, com ondas de crista longa a 2D; estados de agitação criados externamente e armazenados em ficheiro; e ondas regulares, normais ao gerador e oblíquas. Um sistema de absorção activa das reflexões encontra-se também disponível.

A medição da elevação instantânea da superfície livre da água, em qualquer ponto do domínio de ensaio, é realizada por sondas de níveis hidrodinâmicos, que podem ser de haste longa (recentemente adquiridas) ou de haste curta.

No estudo em modelo físico do comportamento de navios amarrados é necessário medir com precisão os movimentos do navio, relativamente a um determinado ponto de referência (*e.g.* centro de gravidade - CG), segundo os seis graus de liberdade possíveis (6GL). Considerando que o modelo do navio é um corpo rígido é possível, partindo das séries temporais dos movimentos do ponto de referência, conhecer os movimentos, as velocidades e as acelerações noutros pontos do navio, a partir do seu posicionamento relativamente ao ponto de referência.

Neste trabalho encontra-se a ser utilizado o sistema *Qualisys - Motion Capture System*, que recorre a tecnologia de detecção óptica para a medição dos movimentos do modelo do navio. O princípio básico de funcionamento do sistema consiste em expor marcas ou alvos reflectores (passivos), fixos rigidamente ao modelo de navio, Figuras 12 e 13, à luz infra-vermelha emitida por câmaras digitais especiais de alta resolução - *ProReflex MCU*. Estas câmaras, após calibração, detectam a luz reflectida e tratam a informação recebida. Os dados digitais obtidos em cada câmara são enviados para a unidade de processamento. Nessa unidade, o software *QTM - Qualisys Track Manager*, combina a informação 2D recebida de cada câmara, determinando o posicionamento 3D de cada marca, em cada instante. Isto é possível apenas para as marcas localizadas na zona de intersecção da vista de pelo menos duas câmaras. Estão disponíveis três câmaras, o que permite uma maior precisão nas medições e cobrir todo o volume de teste com interesse dentro do tanque de ondas.

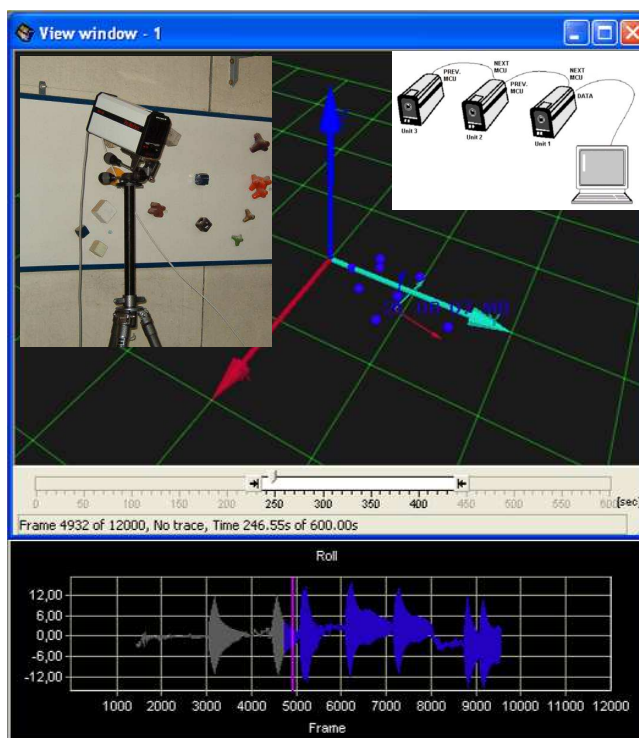


Figura 12. Sistema *Qualisys - Motion Capture System*.

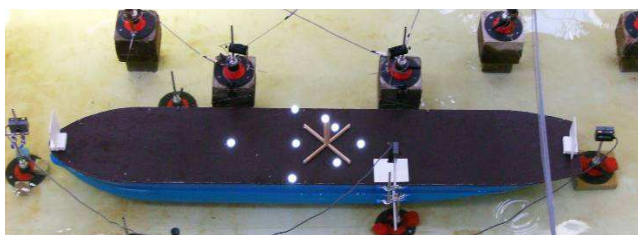


Figura 13. Marcas reflectoras fixas ao convés do modelo do navio.

Tratando-se da observação do movimento de um corpo rígido, o movimento do conjunto das marcas é decomposto segundo cada um dos 6GL (três translações e três rotações) que este pode experimentar. Para tal é necessário que o corpo rígido esteja definido por três ou mais marcas com posições fixas entre si. A definição de corpo rígido permite também ao sistema identificar e seguir os movimentos de vários corpos dentro do volume de medição.

A medição dos movimentos é realizada à distância, sem necessidade de contacto físico do sistema com o modelo (sem perturbação). É importante realçar que as medições com este sistema são susceptíveis de serem influenciadas pela entrada de luz solar directa na zona de testes.

Encontra-se também disponível o sistema *HR Wallingford - Ship Movement Measurement*, para a medição dos movimentos do navio amarrado segundo 6GL.

O sistema utiliza seis sensores laser de deslocamentos, montados na proximidade do navio. A cada um dos sensores laser está associada uma placa de cor branca, convenientemente posicionada no modelo, que funciona como alvo para o emissor de luz, Figura 14. O posicionamento nominal do sensor laser relativamente ao respectivo alvo (zero do registo) deve ser de 100 mm. O intervalo de medição situa-se entre os 60 e 140 mm. Os sensores laser possuem uma resolução de 0.18 mm e uma resposta a 700Hz@3dB.



Figura 14. Sistema HR Wallingford – Ship Movement Measurement.

Os sensores laser permitem determinar, em cada instante, a distância a que cada uma das placas colocadas no navio se encontra. O *output* dos seis sensores, depois de tratado é convertido no movimento do CG do navio, nos seus 6 GL. A medição realiza-se sem necessidade de contacto com o modelo, evitando-se o uso de braços de suporte e outros dispositivos que possam interferir com o equilíbrio e a distribuição de massas do navio. Os dados adquiridos podem depois ser analisados estatística e espectralmente, assim como correlacionados com medições de outros dispositivos (e.g. agitação marítima ou forças nos cabos de amarração e nas defensas).

Os dispositivos de simulação dos cabos de amarração e das defensas permitem a reprodução das características elásticas destes no modelo físico e a medição contínua das forças aplicadas durante os ensaios. As séries de dados obtidas são enviadas para uma unidade central para posterior tratamento e análise.

#### 5.4 Calibração do Modelo Físico do Navio

Após construção do modelo físico do navio à escala, é necessário proceder à sua calibração 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. Durante a fase de calibração são colocados dentro do modelo pesos de lastro, para que este adquira o calado (deslocamento) e a distribuição de massas pretendidos. Posteriormente, faz-se a verificação das propriedades estáticas e dinâmicas do modelo, nas direcções transversal e longitudinal. A fase de calibração, realizada de forma iterativa, termina quando as características estáticas e dinâmicas do modelo são equivalentes às do navio real, para uma dada condição de teste (situação de carga).

A metodologia de calibração do modelo do navio compreendeu a seguinte sequência de operações:

1. Determinação do peso do modelo do navio vazio (peso do casco mais convés removível);
2. Determinação do posicionamento aproximado do CG do modelo do navio vazio. Cálculo da massa total dos pesos de lastro necessários para obtenção do deslocamento pretendido. Determinação do seu posicionamento aproximado no modelo.
3. Colocação sequencial dos pesos de lastro no modelo. Se o navio se encontrar a flutuar, os pesos de lastro são colocados de forma alternada, entre a proa e a popa.

O posicionamento dos pesos de lastro dentro do navio, em primeira aproximação, é definido com base em equações de equilíbrio de momentos e de igualdade de momentos de inércia relativamente a um conjunto de eixos ortogonais entre si e passando pelo CG do modelo.

As primeiras visam garantir o correcto posicionamento do CG e as segundas a reprodução no modelo dos raios de giração transversal e longitudinal do navio real. Estes estão directamente relacionados com o período natural das oscilações de rolo e de caturrar, respectivamente.

O posicionamento definido para os pesos de lastro, Figura 15 e 16, será posteriormente ajustado, de forma iterativa, com base nos resultados dos testes de inclinação transversal e longitudinal, e na medição dos períodos naturais de oscilação do navio.

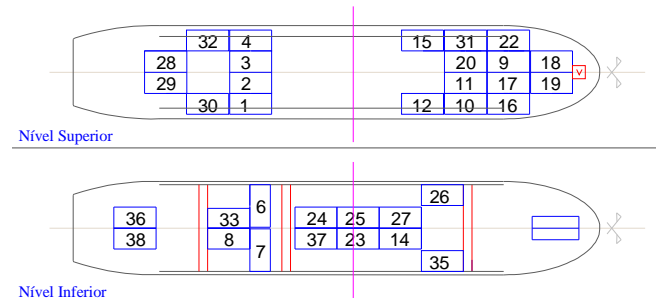


Figura 15. Esquema genérico de disposição dos pesos de lastro dentro do modelo do navio do tipo petrolero.



Figura 16. Modelo do navio com pesos de lastro no interior.

##### 5.4.1. Calibração transversal do modelo do navio

A verificação do posicionamento vertical do CG do modelo do navio faz-se através de uma experiência de inclinação transversal, realizada em condições de águas profundas (razão profundidade de água/calado do navio superior a 2) e de acordo com o esquematizado na Figura 17. Esta experiência consiste em deslocar horizontalmente um dado peso - P, incluído no deslocamento do modelo e com o seu CG aproximadamente coincidente com o do modelo, uma determinada distância na direcção transversal. A medição do ângulo de inclinação transversal ( $\theta$ ) permite a posterior determinação da altura metacêntrica transversal estática, e a verificação do posicionamento vertical do CG do modelo.

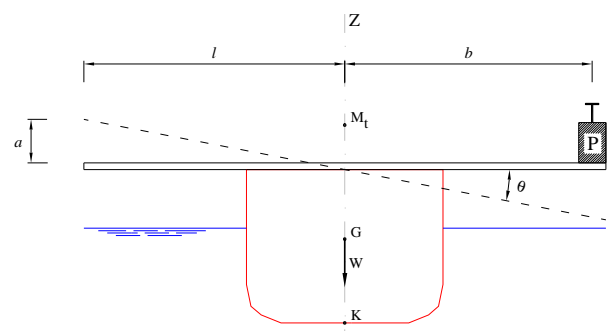


Figura 17. Experiência de inclinação transversal.

Supondo que o modelo do navio, a flutuar em águas paradas, se encontra transversalmente horizontal, o seu CG situar-se-á ao longo de um eixo vertical<sup>1</sup>. Admitindo que a forma do casco do navio se encontra correctamente reproduzida no modelo, a altura do metacentro transversal do navio relativamente à quilha também se encontra correcta, uma vez que esta depende apenas da forma da fracção do casco do navio que se encontra submerso.

Nas condições referidas, a verificação da posição vertical do CG do navio reduz-se à comparação do valor da altura metacêntrica medida no modelo com a prevista para a condição de carga do navio. Caso o valor medido no modelo seja diferente do previsto, é necessário fazer o ajuste do posicionamento dos pesos de lastro colocados dentro do navio, na direcção vertical. Um valor de altura metacêntrica medido superior ao previsto implica a necessidade de subir a posição vertical dos pesos de lastro.

Na experiência de inclinação transversal, a altura metacêntrica do navio pode ser determinada com base na Eq. 1. Esta equação resulta do equilíbrio de momentos das massas (navio e peso - P) relativamente ao eixo longitudinal de rotação do modelo, considerando que o ângulo de inclinação deste, por aplicação do peso P, é pequeno, Figura 17.

$$\overline{GM}_t = \frac{P \times b \times l}{W \times a} \quad [1]$$

em que W representa o peso do navio e P o peso do bloco usado na experiência. O significado das variáveis  $b$ ,  $l$  e  $a$  está explicitado na Figura 17. Neste estudo, a medição do ângulo de inclinação transversal do navio ( $\theta$ ) foi realizada com o sistema *Qualisys*, Figura 18.



Figura 18. Experiência de inclinação transversal.

A verificação da distribuição transversal de massas faz-se por comparação do período de rolo previsto para o modelo com o período de rolo efectivamente medido. Para tal o navio é colocado a oscilar transversalmente, em condições de águas profundas e inicialmente paradas, o mais afastado possível de fronteiras reflectoras. É fundamental que apenas seja excitado o tipo de oscilação pretendido (e.g. a excitação da arfagem fora do CG do navio dá origem também a oscilações de rolo). O período da oscilação de rolo previsto para o modelo,  $T_r$ , depende quer da altura metacêntrica transversal,  $\overline{GM}_t$ , quer do raio de giração do

navio relativamente ao seu eixo longitudinal central,  $i_x$ , e é igual a,

$$T_r = 2\pi \sqrt{\frac{i_x^2 + \frac{A_{44}}{M}}{g \overline{GM}_t}} \quad [2]$$

em que  $A_{44}$  representa o momento de inércia adicionado para a oscilação de rolo em fase com a aceleração angular dessa oscilação, e que pode ser desprezado em condições de águas profundas, e M a massa do navio.

Caso o valor de  $T_r$  previsto seja diferente do medido no modelo físico, o posicionamento transversal dos pesos de lastro colocados dentro do modelo do navio deverá ser modificado. O período de rolo do navio deverá ser calculado através da média de pelo menos 5 oscilações. A medição dessas oscilações é efectuada com o sistema *Qualisys*. A Figura 19 apresenta a variação da amplitude das oscilações de rolo do modelo durante a realização de um teste de calibração transversal. O cálculo do período natural de rolo é efectuada apenas para a fase correspondente ao amortecimento natural da oscilação.

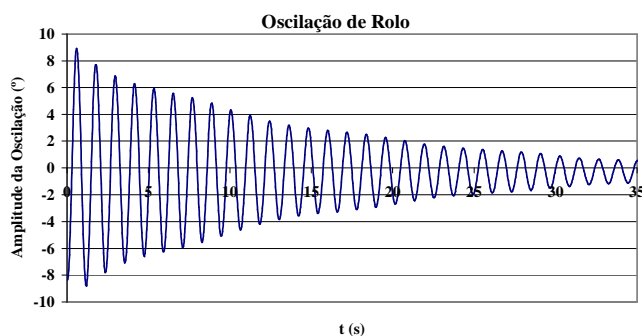


Figura 19. Amplitude das oscilações de rolo do modelo durante a realização de um teste de calibração transversal.

Se o valor de  $T_r$  medido no modelo é superior ao valor de  $T_r$  previsto, os pesos de lastro colocados dentro do navio deverão ser aproximados do seu eixo longitudinal central. Caso se verifique o oposto, os pesos de lastro deverão ser afastados, de forma a aumentar o momento de inércia relativamente a esse eixo. Após concordância entre os valores de  $T_r$ , medido no modelo e previsto (referência), a altura metacêntrica transversal deverá ser confirmada, pois a alteração da posição dos pesos de lastro dentro do modelo poderá traduzir-se numa ligeira alteração da  $\overline{GM}_t$ .

A calibração transversal dá-se por concluída quando quer a altura metacêntrica transversal quer o período natural da oscilação de rolo do navio real estão correctamente reproduzidos no modelo físico.

#### 5.4.2. Calibração longitudinal do modelo do navio

Caso o modelo do navio se apresente longitudinalmente horizontal ou, alternativamente, com o mesmo caimento que o navio no protótipo, a posição do CG do navio ao longo do eixo longitudinal está correcta. Uma vez que a distribuição transversal de massas, a posição do CG e a posição do metacentro longitudinal (que depende apenas da forma geométrica do casco do modelo dentro de água)

<sup>1</sup> Assume-se que o sistema de eixos passa pelo CG do navio, cuja posição se pretende determinar com a realização da experiência.



estão correctas, é apenas necessário verificar a distribuição longitudinal de massas do modelo. No entanto, e analogamente ao realizado na calibração transversal do navio, poderá verificar-se a altura metacêntrica longitudinal do modelo através de um teste de inclinação longitudinal, realizado nos mesmos moldes que o teste de inclinação transversal. O ângulo de inclinação longitudinal do navio é também medido com o sistema *Qualisys*, Figura 20.



Figura 20. Experiência de inclinação longitudinal.

Como o caturrar do navio é um movimento fortemente amortecido, a medição do período desta oscilação no modelo é difícil. Nestas condições, a determinação do período natural dessa oscilação requer que o movimento seja continuamente forçado, isto é, em vez de se aplicar uma força e de seguida registar as oscilações do modelo até o movimento se extinguir (caso da oscilação de rolo), o caturrar do modelo terá de ser continuamente excitado por aplicação de uma força em fase com o período das oscilações.

A utilização do sistema *Qualisys* e de uma rotina de cálculo automático, desenvolvida em *Matlab*, possibilita a determinação do período natural de caturrar, o que facilita a tarefa.

O período natural da oscilação de caturrar previsto para o modelo do navio,  $T_p$ , depende quer da altura metacêntrica longitudinal,  $\overline{GM}_l$ , quer do raio de giração relativamente a um eixo transversal que passa pelo seu CG do navio,  $i_y$ , é igual a,

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{i_y^2 \left( \frac{M+M'}{M} \right)}{g \overline{GM}_l}} \quad [3]$$

em que  $M$  representa a massa do modelo do navio e  $M'$  a correspondente massa adicionada. Nas condições em que a calibração do modelo é efectuada pode considerar-se que

$$\left( \frac{M+M'}{M} \right) \approx 3.$$

Caso o período da oscilação de caturrar medido seja diferente do previsto com base na Eq. 3, deverá proceder-se ao rearranjo dos pesos de lastro dentro do navio, na direcção longitudinal, até que o valor de  $T_p$  medido seja idêntico ao valor previsto.

Se o período natural da oscilação de caturrar medido for superior ao previsto, os pesos de lastro terão de ser aproximados do eixo transversal, caso contrário os pesos deverão ser afastados desse eixo.

A alteração da posição dos pesos de lastro durante a calibração longitudinal do navio poderá afectar a calibração transversal efectuada anteriormente. Assim, a calibração transversal do modelo do navio deverá ser repetida com o objectivo de verificar se a altura metacêntrica transversal e o período natural de rolo continuam correctos.

Após a fase de calibração, o navio é colocado a flutuar à profundidade de água definida para os ensaios em modelo físico, e os períodos naturais de oscilação voltam a ser medidos de modo a incluírem os efeitos da massa adicionada para essa profundidade. O modelo do navio é depois amarrado à estrutura de acostagem e amarração.

O modelo físico do navio deverá ser periodicamente inspeccionado com o objectivo de verificar se não se encontra danificado e se não entrou água para o seu interior.

### 5.5 Calibração dos Cabos de Amarração e das Defensas

Os dispositivos de simulação dos cabos de amarração e das defensas possibilitam a reprodução das características elásticas destes no modelo físico, e permitem a medição rigorosa das forças neles aplicadas a uma frequência de aquisição adequada.

Os cabos de amarração, especialmente os constituídos por fibras sintéticas, apresentam uma relação não linear força-alongamento. No modelo físico é possível reproduzir estas características através de uma associação de molas helicoidais, Figura 21, com diferentes características de rigidez, em que pelo menos uma delas apresenta um alongamento condicionado (limitado). Para a rigidez global do conjunto contribui também a rigidez do transdutor de força (TF) utilizado para a medição das forças aplicadas. Estes TF foram desenvolvidos pela *HR Wallingford, U.K.*



Figura 21. Associação em série de duas molas helicoidais de precisão.

Como se assume que as características elásticas dos cabos de amarração reais são reproduzidas no modelo físico exclusivamente pela associação de molas e pelo TF, o fio que amarra o modelo do navio à estrutura de acostagem terá de ser de elevada rigidez. Neste estudo está a ser usado fio de *keolar*.

Para a calibração dos cabos de amarração e das defensas foi desenvolvido um dispositivo constituído por um braço fixo, para amarração do TF, sozinho ou em conjunto com uma associação de molas, e por uma plataforma móvel, à qual se liga a extremidade do TF ou do conjunto TF-molas, Figura 22. Os deslocamentos da plataforma móvel são controlados pelo utilizador. Como os TF se encontram ligados à unidade central de aquisição, é possível medir para cada valor de alongamento imposto ao conjunto (através da movimentação da plataforma móvel) a correspondente voltagem. Os registos permitem desenhar o gráfico alongamento-voltagem do conjunto. Aplicando ao conjunto TF- molas cargas de valor crescente e conhecido, e

registando as variações de voltagem medidas pelo TF, obtém-se o gráfico força-voltagem para o referido conjunto.



Figura 22. Dispositivo de calibração dos cabos de amarração e das defensas: calibração de uma defesa.

Conjugando os registos força-voltagem e alongamento-voltagem é possível determinar o diagrama força-alongamento, relacionado com as características elásticas do conjunto. O diagrama força-voltagem permite a conversão das voltagens medidas durante os ensaios em forças aplicadas nos cabos de amarração e nas defensas. O processo de calibração dos cabos de amarração e das defensas é um processo iterativo, e termina quando se obtêm as características de elasticidade pretendidas para cada conjunto TF – associação de molas.

Na Figura 23 apresenta-se o modelo físico de um duque d’Alba de acostagem e amarração, com os dispositivos de simulação dos cabos de amarração (1) e das defensas (2) instalados.

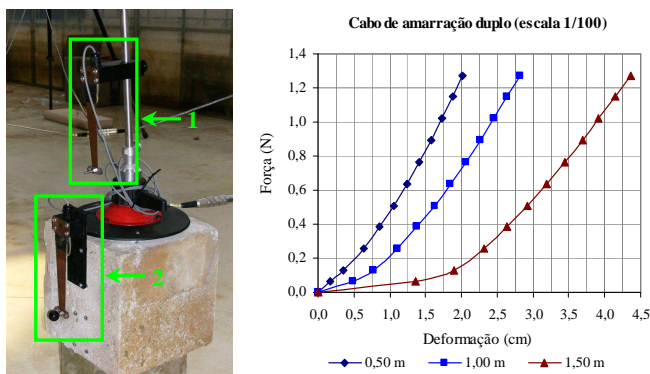


Figura 23. Modelo de um duque d’Alba de acostagem e amarração instrumentado, à esquerda; características elásticas de cabos de amarração duplos (no modelo) com diferentes comprimentos (0,5 m, 1,0 m e 1,5 m), à direita.

Começou-se por considerar as curvas força-deformação dos cabos de amarração usadas pelos navios do tipo petroleiro que recorrem ao Posto “A” do Terminal Petrolero de Leixões, Figura 23. O comportamento não linear da curva força-deformação dos cabos de amarração reais não foi ainda considerado. Nesta primeira fase optou-se pela consideração, para cada cabo de amarração, de uma rigidez equivalente, determinada com base numa igualdade definida em termos de energia de deformação do cabo até à rotura.

A calibração dos dispositivos de simulação das defensas no modelo é feita recorrendo a um procedimento semelhante ao usado para a calibração dos cabos de amarração.

Após calibração dos oito cabos de amarração e das duas defensas, é necessário proceder à verificação da rigidez global do sistema de amarração, recorrendo a medições “*in situ*”. Com o navio convenientemente instalado no tanque de ondas e amarrado à estrutura de acostagem, aplica-se uma força longitudinal (ou transversal) ao navio e analisa-se o seu comportamento oscilatório como resposta à aplicação dessa força. Como resultado obtém-se a rigidez combinada do sistema de amarração instalado.

## 5.6 Condições de ensaio

O estudo envolve a realização de ensaios com agitação marítima regular e irregular, e procura analisar a influência dos seguintes parâmetros no comportamento de um navio amarrado:

- características da agitação marítima incidente;
- *layout* de amarração do navio;
- aplicação de pré-tensão nos cabos de amarração;
- características dos cabos de amarração e das defensas;
- nível de maré;
- proximidade da estrutura de acostagem à cabeça do quebramar;
- estado de carga do navio;
- duração da tempestade.

A análise é realizada com base nas séries temporais dos movimentos do navio amarrado, segundo seis graus de liberdade (afastamento longitudinal, abatimento, arfagem, rolo, caturrar e guinada), e dos esforços nos cabos de amarração e nas defensas, obtidas para as várias condições de teste.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Ref. PTDC/ECM/72835/2006 e Ref. SFRH/BD/16671/2004) e à Administração dos Portos do Douro e Leixões o apoio financeiro para a realização deste trabalho. Agradecem também ao INETI-IST o empréstimo do sistema de medição de deslocamentos *Qualisys – Motion Capture System* e aos alunos do projecto PESC “Dolphin” que colaboraram na construção do modelo físico do navio petroleiro.

## Referências

- IHRH-FEUP/IST (2005). *Estudo sobre as condições de operacionalidade no Terminal Petrolero do Porto de Leixões*, 6 Volumes, Porto, Portugal.
- Rita, M. (1984). *On the behaviour of moored ships in harbours – theory, practice and model tests*, Relatório LNEC 9/85.
- 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.