

CAPÍTULO 9

A IMPORTÂNCIA DA MODELAÇÃO FÍSICA COMO TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO PARA A ENGENHARIA MARÍTIMA

**Francisco Taveira Pinto, Hugo G. Lopes, Fernando Veloso Gomes,
Paulo Rosa Santos**
e-mail: {fpinto, hglopes, vgomes, pjrs}@fe.up.pt

*Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (IHRH), Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto, Portugal*

9.1 INTRODUÇÃO

De forma a comprovar e validar o dimensionamento efectuado pelas abordagens correntes, a Engenharia Costeira recorre por vezes a várias técnicas complementares, nomeadamente:

- Medições e observações de campo;
- Modelos matemáticos;
- Medições e observações em laboratório ou modelação física.

As medições e observações de campo, necessárias para um correcto conhecimento do meio físico e até da implementação das obras costeiras,

possuem vantagens e desvantagens, sendo de referir em relação às primeiras:

- Representam o processo físico real;
- Facilitam ao investigador o conhecimento do meio;
- Quando bem planificadas, geram pontos de amostragem de grande qualidade.

Quanto aos inconvenientes das observações de campo, são habitualmente referidos os seguintes:

- Elevado custo;
- Falta de controlo sobre muitas das variáveis;
- Impossibilidade de controlar as variáveis presentes e não medidas;
- Impossibilidade de modificar as condições de contorno;
- Em alguns casos, há falta de precisão nos métodos de medida;
- Não facilitam – *a priori* – a compreensão dos processos físicos.

Uma outra ferramenta muito utilizada em Engenharia Costeira para a previsão da propagação da agitação marítima e da interacção com as estruturas costeiras e portuárias é a modelação matemática. Tal como as medições e observações de campo, apresenta vantagens e desvantagens, sendo de referir em relação às primeiras:

is

- Baixo custo;
- Controlo completo dos processos analisados;
- Fácil modificação das condições de contorno;
- Facilitam a obtenção de informação em qualquer número de pontos do domínio desejado;
- Facilitam a compreensão dos processos envolvidos e analisados;
- Com experiência, facilitam a obtenção de estimativas qualitativas rápidas;
- São muito produtivos em termos de apresentação de resultados;

e

o

Quanto aos inconvenientes da modelação matemática, são habitualmente referidos os seguintes:

- São uma representação aproximada dos processos físicos reais;
- Requerem sempre uma calibração (dados de laboratório ou de campo);
- As condições de contorno ou de fronteira são aproximadas;
- Os resultados dependem da abordagem numérica utilizada;
- O campo de validade é limitado pelas equações utilizadas.

a

s

s

,

Em muitos casos, em particular quando se trata de obras costeiras ou portuárias com importância significativa e é necessário verificar o pré-dimensionamento efectuado, ou os resultados dos modelos numéricos, é

necessário recorrer à experimentação em laboratório, ou seja à modelação física.

Os principais objectivos do recurso à modelação física estão essencialmente relacionados com a obtenção de:

- - Informação qualitativa de fenómenos não descritos ou não compreendidos;
- Dados para a calibração de uma aproximação teórica;
- Dados para verificar ou rejeitar uma aproximação teórica;
- Dados à escala de um fenómeno complexo que não tenha ainda formulação matemática. Neste caso é importante determinar:
 - Os efeitos de escala que podem surgir na extrapolação para o protótipo;
 - O intervalo de validade das variáveis e das formulações obtidas.

Tal como as medições e observações de campo, e a modelação matemática, a modelação física apresenta vantagens e desvantagens, sendo de referir em relação às primeiras:

- Custo intermédio e controlável;
- Representam o mundo fisico real;
- É possível controlar as variáveis envolvidas;

- É possível controlar as condições de contorno ou de fronteira;
- As medições são relativamente fáceis de efectuar;
- Facilitam a compreensão dos processos físicos;
- Facilitam a obtenção de estimativas qualitativas.

Quanto aos inconvenientes da modelação física, são habitualmente referidos os seguintes:

- Morosidade e custo da análise de alternativas;
- Nos modelos à escala, a semelhança hidráulica é sempre parcial;
- Nos modelos à escala, o controlo das condições de contorno é parcial;
- Dificuldade em efectuar medidas em algumas zonas.

9.2 O EXEMPLO DO QUEBRAMAR NORTE DE LEIXÕES

O exemplo que se apresenta ilustra precisamente a necessidade de recurso à modelação física para análise dos galgamentos e da estabilidade do quebramar Norte do porto de Leixões.

A ocorrência de galgamentos e a estabilidade do manto resistente constituem dois dos principais problemas das estruturas portuárias protegidas por quebramares. No caso particular do quebramar Norte do porto de Leixões, a área interior abriga um terminal petrolífero, designado por Posto A, no qual as exigências em termos de segurança são elevadas e que, não se verificando, limitam muitas vezes a operacionalidade do

terminal. Tendo por objectivo melhorar as condições de operacionalidade do terminal petrolífero de Leixões, através da redução dos galgamentos que ocorrem durante o ano, foi construído um modelo reduzido 2D correspondente à secção do Posto A do quebramar, para ser testado no tanque de ondas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

O porto de Leixões, localizado na costa Oeste portuguesa, situa-se a cerca de 4,5 km a Norte da embocadura do rio Douro, Figura 9.1.

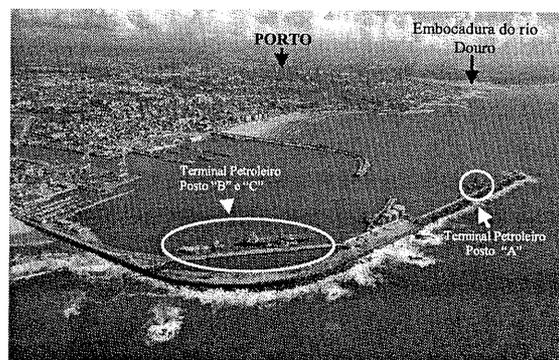


Figura 9.1. Vista aérea do porto e dos terminais petrolíferos

A primeira fase de construção do porto teve início em 1882 e terminou no ano de 1892. Devido ao crescimento do tráfego portuário verificado durante o seu período de exploração, sofreu várias intervenções tendo em vista a sua ampliação.

de
ue
D
no
to

De entre as várias intervenções destacam-se as obras de escavação das docas interiores, o prolongamento e subsequente alteamento do quebramar Norte e a construção do quebramar submerso de protecção da secção da cabeça do quebramar norte, construído na sequência de uma série de episódios de destruição deste sector, Figura 9.2.

: a

Constituindo um dos mais importantes portos do país, e o mais importante do norte do país, representa aproximadamente 25% do comércio externo português.

A operacionalidade do posto "A" do terminal petrolífero depende significativamente da eficiência do quebramar no que se refere aos níveis de galgamento e transmissão da agitação para a zona interior do porto, podendo também a energia difractada pela estrutura ter um papel relevante.

e
O
S

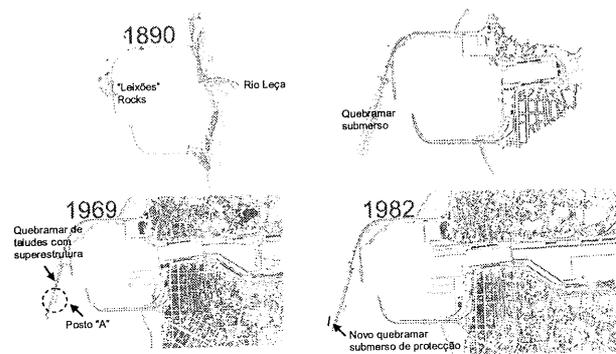


Figura 9.2. Evolução geral do porto de Leixões.

Por essa razão, a melhoria das condições de operacionalidade no terminal constitui para o porto de Leixões e para a entidade que explora o terminal, um aspecto importante.

Com o objectivo de contribuir para essa melhoria, foram realizados diversos estudos, nomeadamente ensaios bidimensionais em modelo físico, realizados em duas fases distintas. Na primeira fase de ensaios foram ensaiadas a solução actual e outras 10 soluções alternativas apenas com agitação regular.

Com estes ensaios pretendeu-se estudar os galgamentos e a estabilidade do manto resistente na estrutura actual e nas soluções alternativas. Para cada ensaio realizado foram efectuados registos da variação da superfície livre da água, bem como registos vídeo e fotográfico, onde se procurou analisar o movimento dos blocos e o galgamento sobre a estrutura. O volume de água galgado em cada ensaio foi também registado.

Na segunda fase de ensaios foram testadas, com recurso a agitação irregular e a blocos de alta densidade, as 3 hipóteses que se mostraram mais eficazes na primeira fase, no que se refere à redução dos galgamentos e à melhoria da estabilidade do manto resistente.

no
o
os
o,
m
m
a
es
la
o,
a
io
is
à

9.3 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E ENSAIOS REALIZADOS

9.3.1 ENSAIOS REALIZADOS COM AGITAÇÃO REGULAR

Os ensaios foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas tem 28.0m de comprimento, 12.0 m de largura e 1.0m de profundidade, Figura 9.3. Os ensaios bidimensionais foram realizados num canal de 0.5m de largura materializado no interior do tanque através da implantação de uma divisória acrílica.

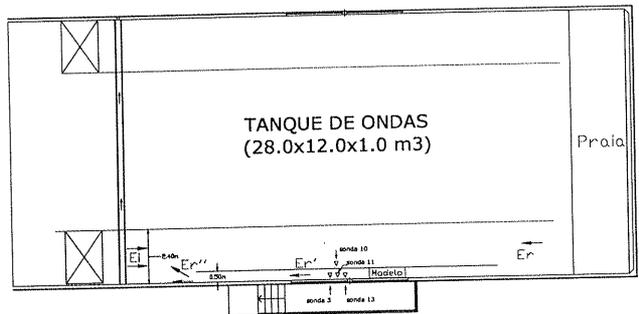


Figura 9.3. Tanque de ondas do laboratório de Hidráulica da Faculdade De Engenharia da Universidade do Porto.

A estrutura foi construída à escala geométrica 1:60, tendo sido reproduzidos os diversos elementos constituintes nomeadamente os tetrápodes de 40 t, os blocos cúbicos de 90 t e a superestrutura.

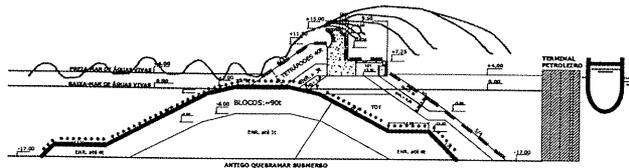


Figura 9.4. Perfil transversal de projecto com o quebramar submerso de protecção da cabeça do quebramar. (Ponteado – 2º fase de construção (1940); traço interrompido – 3º fase de construção (1969)).

Para a construção das sub-camadas foram escolhidos criteriosamente os materiais de forma a respeitarem tanto quanto possível a escala referida e a minimizarem os efeitos de escala, Figura 9.4 e Figura 9.5.

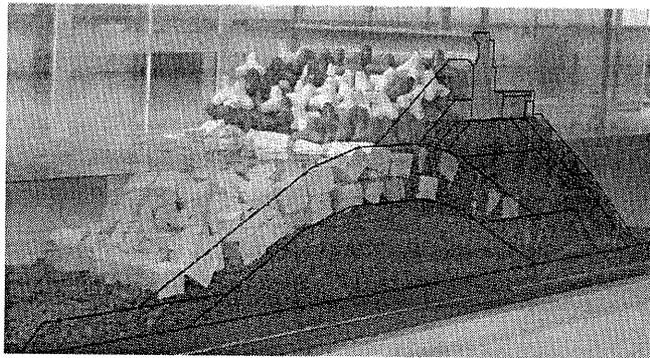


Figura 9.5. Modelo físico, construído de acordo com o projecto de 1969.

A Figura 9.6 apresenta as onze soluções testadas com agitação regular.

te
e

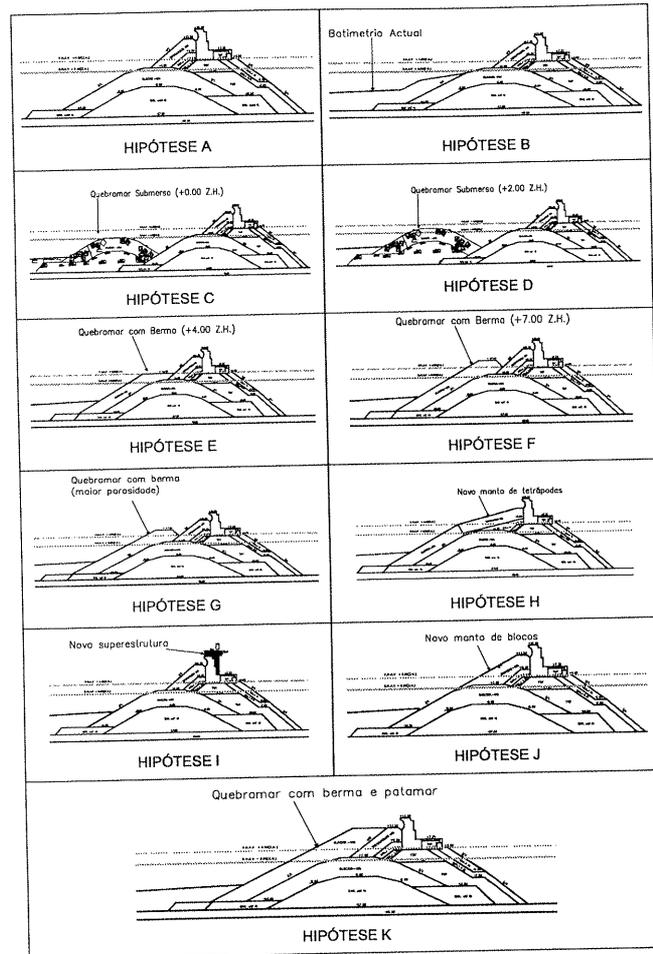


Figura 9.6. Hipóteses testadas.

As principais características de cada solução testada são:

- **Hipótese A** – estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota -20.0m ZH;
- **Hipótese B** – estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota de -20.0m ZH e batimetria exterior de acordo com o levantamento topo-hidrográfico de Maio de 2003;
- **Hipótese C** – estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota -20.0m ZH e batimetria exterior de acordo com levantamento topo-hidrográfico de Maio de 2003, protegida com um quebramar submerso de acordo com as características de idêntica estrutura que protege a cabeça do quebramar norte do Porto de Leixões. Cota do coroamento igual a +0.0 ZH;
- **Hipótese D** – estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota -20.0m ZH e batimetria exterior de acordo com levantamento topo-hidrográfico de Maio de 2003, protegida com um quebramar submerso de acordo com as características de idêntica estrutura que protege a cabeça do quebramar norte do Porto de Leixões. Cota do coroamento igual a +2.0 ZH;
- **Hipótese E** – Idêntica à Hipótese B mas com uma berma aderente com o coroamento sensivelmente à cota +4,0 m ZH, com blocos de 90 tf;
- **Hipótese F** – Idêntica à Hipótese E mas com o coroamento sensivelmente à cota +7,0 m ZH (porosidade de 5%);
- **Hipótese G** – Idêntica à Hipótese F mas com uma densidade de colocação dos blocos menor (porosidade de 26%);

m
m
o
m
m
m
ca
de
m
m
m
ca
le
te
le
o
le

- **Hipótese H** – Idêntica à Hipótese E mas com o talude do manto de tetrápodes fazendo uma inclinação de 5:1 (H:V);
- **Hipótese I** – Idêntica à Hipótese B mas com nova superestrutura até à cota +17,0 m;
- **Hipótese J** – Idêntica à Hipótese B mas com um manto resistente de blocos de 90 t, no prolongamento do quebramar submerso;
- **Hipótese K** – Idêntica à Hipótese E mas com cota de coroamento sensivelmente igual a +11,5 m;

O plano de ensaios consistiu em testar cada hipótese para pelo menos dois níveis de maré (+2.0 e +4.0 ZH), três períodos de onda (13, 16, 20s), definidos com base em ensaios realizados anteriormente (Vera Cruz, 1993) e considerando, para cada período, diferentes alturas de onda. A sequência de ensaios adoptada para cada estrutura testada, foi a de alturas de onda crescentes e períodos crescentes para cada nível de maré definido. As alturas de onda testadas variaram entre os 6.0m e os 13.0 m.

Quanto ao número de ondas em cada ensaio, foi definido um número de 512 ondas, admitindo que seriam necessárias pelo menos 300 para que a análise da estabilidade fosse válida. Os registos da variação da superfície livre da água contabilizaram 4096 valores para cada ensaio sendo o seu intervalo de aquisição de 1/8 do período de onda.

Para a recolha e controlo do volume de água galgado foi utilizado um recipiente graduado construído para o efeito e que foi colocado acoplado à superestrutura, Figura 9.7.

Tomando por base o volume acumulado durante o ensaio ou, nos casos em que a capacidade do recipiente foi ultrapassada, o tempo de enchimento do recipiente, determinou-se o caudal médio de galgamento para cada ensaio.

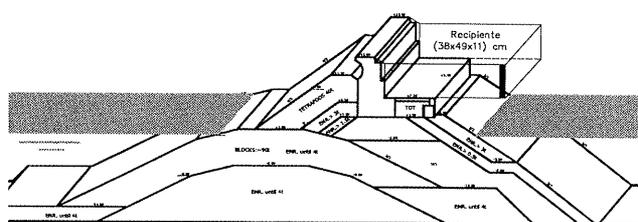


Figura 9.7. Recipiente utilizado para armazenar o volume de água resultante dos galgamentos.

9.3.2 ENSAIOS REALIZADOS COM AGITAÇÃO IRREGULAR E BLOCOS DE ALTA DENSIDADE

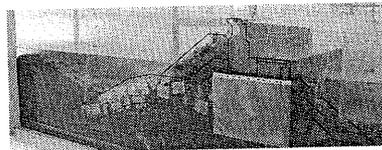
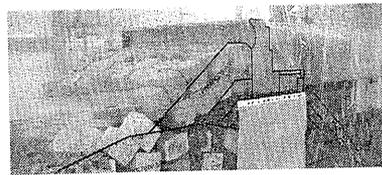
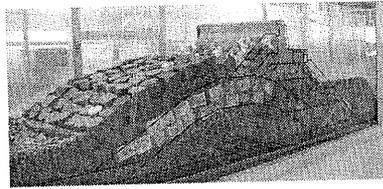
Na segunda fase de ensaios foram testadas as hipóteses G, J e D, Figura 9.8, que, pelo seu comportamento, mereceram um estudo mais detalhado.

Estes perfis transversais foram novamente ensaiados, utilizando para além da agitação regular, agitação irregular e ainda, em alternativa aos blocos de densidade normal, anteriormente utilizados, blocos de alta

os
de
ito

densidade com a mesma dimensão dos anteriores mas mais pesados e outros ainda com o mesmo peso que os de densidade normal mas mais pequenos.

Para cada perfil transversal foram também efectuados ensaios com agitação regular.



,
is

Figura 9.8. Modelos físicos das hipóteses G, J e D.

a
s
a

9.4 RESULTADOS

Ensaio com Agitação Regular

A Figura 9.9 apresenta algumas imagens retiradas do registo video efectuado, onde é possível vislumbrar alguns galgamentos. Foram também adquiridas fotografias ortogonais antes e depois de cada ensaio de forma a identificar possíveis movimentos dos blocos.

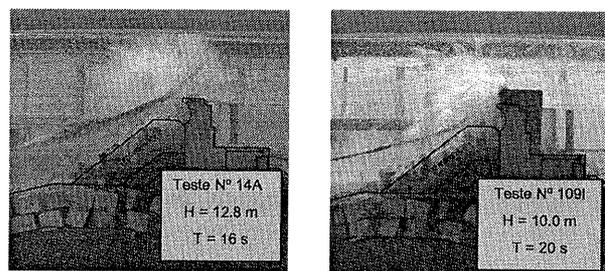


Figura 9.9. Episódios de galgamentos.

Na Figura 9.10 encontram-se compilados os resultados obtidos para cada um dos perfis transversais para o nível de maré +4.0 m ZH (mais desfavorável), sendo possível observar as alturas e períodos das ondas, o número de blocos deslocados, e o caudal médio de galgamento. As condições de agitação podem ser lidas no eixo vertical esquerdo (H - altura de onda; T - período de onda), bem como o número de blocos deslocados em cada teste. O caudal médio de galgamento pode ser lido no eixo vertical

o
m
a

direito. O número de blocos deslocados refere-se a tetrápodes (nas hipóteses A a I) e aos blocos cúbicos (hipóteses J e K), respectivamente.

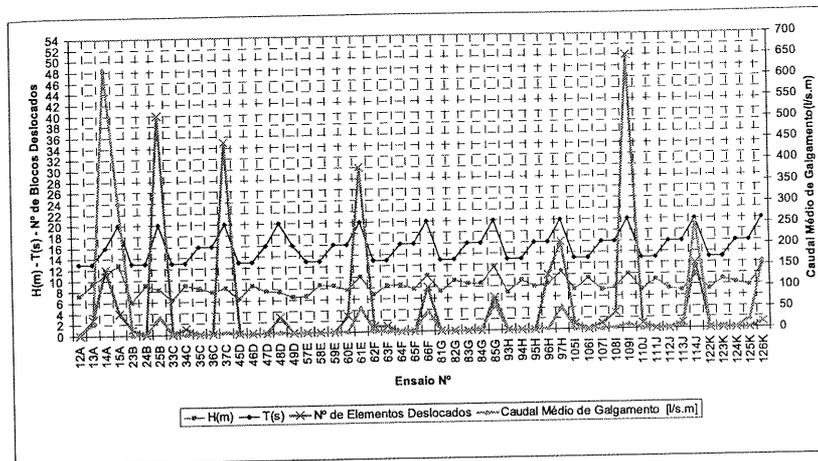


Figura 9.10. Resultados dos ensaios efectuados para o nível de maré +4.0m ZH (Nota: O teste 12A refere-se ao teste 12 para a hipótese A).

a
s
o
s
a
s
l

Relativamente à reflexão da estrutura, foram realizados diversos testes para analisar a energia reflectida recorrendo ao método das três sondas (Taveira Pinto, 2002). A reflexão da estrutura bem como da praia devem ser tidas em consideração, especialmente a sua influência nos resultados finais. A inclinação da praia era de 1:20, valor inferior ao normalmente utilizado em ensaios desta índole, o que levou a valores de energia reflectida relativamente baixos. Devido à configuração da secção de teste, a energia reflectida pelo modelo, foi suficientemente dissipada por difracção, na entrada do pequeno canal de ensaio, conduzindo a valores de energia reflectida muito reduzidos junto ao gerador de ondas.

Ensaio com Agitação Irregular e Blocos de Alta Densidade

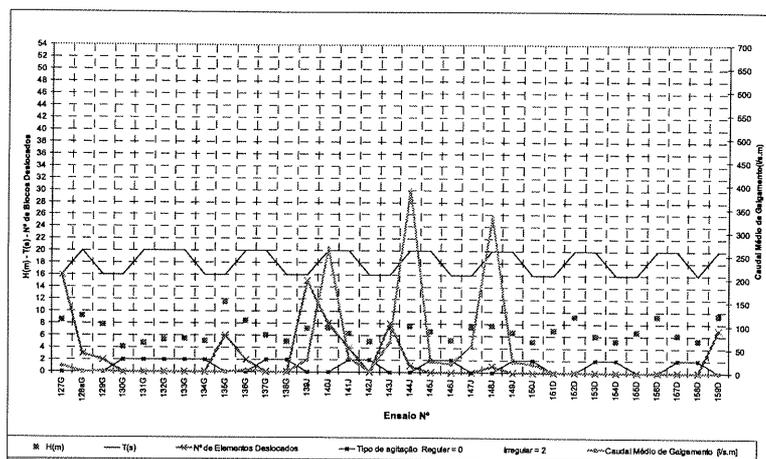


Figura 9.11. Resultados dos ensaios efectuados para o nível de maré +4.0 m ZH, com blocos de alta densidade e agitação regular e irregular (Nota: O teste 127G refere-se ao teste número 127 para a hipótese G).

Na Figura 9.11 encontram-se compilados os resultados obtidos para cada um dos perfis transversais testados na segunda fase de ensaios para o nível de maré +4.0m ZH (mais desfavorável), sendo possível observar as alturas e períodos das ondas, o número de blocos deslocados, e o caudal médio de galgamento. Note-se que também nesta fase foi utilizada agitação regular para comparação com a série de testes anterior. As condições de agitação podem ser lidas no eixo vertical esquerdo da Figura 9.11 (H - altura de onda; T- período de onda), bem como o número de blocos

deslocados em cada teste. O caudal médio de galgamento pode ser lido no eixo vertical direito.

9.5 CONCLUSÕES

Ensaio com Agitação Regular

Os resultados dos ensaios com agitação regular mostram que as situações mais desfavoráveis em termos de galgamento, ocorrem para os períodos e alturas de onda mais elevados, e para o nível de maré +4.0 m ZH como seria de esperar. Para essas situações, os resultados mostram que a Hipótese D (quebramar submerso com coroamento à cota +2.0 m ZH) é a mais eficaz na redução dos galgamentos e na melhoria da estabilidade (medida em termos de número de blocos deslocados).

A presença do quebramar submerso induz a rebentação das ondas, dissipando dessa forma grande parte da energia antes de atingirem o quebramar principal. A distância entre o quebramar submerso e o quebramar principal, materializa uma bacia de dissipação de extrema importância após a rebentação das ondas. A existência da bacia de dissipação mostrou-se fundamental, especialmente para os períodos mais elevados, onde as ondas tendiam a rebentar após passarem sobre o quebramar submerso. A definição da distância entre o quebramar submerso e o quebramar principal foi definida com base em ensaios anteriores onde

essa situação foi estudada tendo em consideração as características da agitação na região.

Dos resultados pode inferir-se que a situação mais desfavorável em termos de galgamentos ocorreu para a hipótese A (correspondente ao perfil de projecto), uma vez que a rebentação das ondas ocorre directamente sobre o manto resistente. Em termos de estabilidade dos blocos, a solução I (nova superestrutura) mostrou-se a mais desfavorável. Embora tenha sido bastante eficaz na redução dos galgamentos, a massa de água reflectida pela superestrutura atingia no refluxo novamente o manto resistente arrastando dessa forma os blocos.

A situação batimétrica actual (hipótese B), mostrou-se mais favorável do que a situação inicial de projecto, em grande parte explicada pela acumulação de sedimentos a barlar da estrutura, funcionando como uma berma de pré-rebentação natural.

As hipóteses C e E não se mostraram totalmente eficazes na indução da rebentação da agitação antes de atingir o quebramar principal.

As hipóteses F, G e K mostraram-se relativamente eficazes na redução dos galgamentos e na melhoria da estabilidade, não tendo sido contudo possível reduzi-los até níveis desejáveis.

la

Ensaio com Agitação Irregular e Blocos de Alta Densidade

m

Da análise dos resultados dos três perfis seleccionados, pode concluir-se que a hipótese D se mostrou a mais favorável, à semelhança do que acontecera para os ensaios com agitação regular da 1ª fase.

fil

re

ra

te

la

lo

A hipótese G mostrou-se também uma hipótese a considerar apresentando resultados satisfatórios, quer ao nível da redução dos galgamentos, quer ao nível da estabilidade do manto resistente.

A hipótese J revelou-se a mais desfavorável das três especialmente ao nível dos galgamentos.

is

la

io

io

ia

o

Relativamente à utilização de blocos de alta densidade, parece existir uma tendência para os blocos de alta densidade com o mesmo peso que os de densidade normal se mostrarem mais eficazes em termos de galgamentos enquanto os blocos de alta densidade com a mesma dimensão que os de densidade normal se revelaram naturalmente mais estáveis pelo facto de serem mais pesados. Contudo, pode afirmar-se que os blocos de alta densidade se mostraram mais eficazes tanto na redução dos galgamentos como na melhoria da estabilidade relativamente aos blocos de densidade normal.

Informação detalhada sobre os ensaios descritos pode ser encontrada no Relatório de Modelação Física (IHRH, 2004), resultante do Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petrolífero do Porto de Leixões

REFERENCIAS

- [1] IHRH (2005). Estudo das Condições de Operacionalidade do Terminal Petroleiro do Porto de Leixões., Relatório da Modelação Física, Volume 1 a 3, Porto, Portugal.
- [2] Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Guedes-Lopes, H., Brogueira-Dias, E., (2004). Evolution and Improvement of Operational Conditions of the Oil Terminal at Leixões Harbour, Portugal. Port & Terminal Technology 2004 Conference & Exhibition, Amsterdão.
- [3] Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Guedes-Lopes, H., Brogueira-Dias, E., (2005). Overtopping Reduction at Leixões Harbour, Portugal. Coastlines Structures and Breakwaters 2005 – ICE, Londres.
- [4] Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Guedes-Lopes, H., Brogueira-Dias, E., (2005). Estudos de Reabilitação do Quebramar Norte do Porto de Leixões. 4ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo-Açores.
- [5] Vera-Cruz, D., Reis de Carvalho, J., (1993). Maciço Submerso de pré-rebentação das ondas como meio de protecção de obras marítimas – O caso do Quebra-mar de Leixões, Memória n.º 796, LNEC, Lisboa.