



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

ESTUDOS DE REABILITAÇÃO DO QUEBRAMAR NORTE DO PORTO DE LEIXÕES

Fernando Veloso Gomes¹, Francisco Taveira Pinto¹, Emílio Brógueira Dias²,
Hugo Guedes Lopes¹

¹Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto
vgomes@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt, hglopes@fe.up.pt

²Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A.
Av. da Liberdade, 4450-851 Leça da Palmeira
brogueira.dias@apdl.pt

Resumo

A estabilidade do manto resistente e a ocorrência de galgamentos constituem dois dos principais problemas dos quebramares de taludes. No caso particular do porto de Leixões, o talude posterior do quebramar, abriga um terminal petrolífero, designado por Posto A, no qual as exigências em termos de segurança são elevadas e que, não se verificando limitam a operacionalidade do terminal. De forma a melhorar as condições de operacionalidade do terminal petrolífero de Leixões, nomeadamente através da redução dos galgamentos que ocorrem durante o ano, foi construído um modelo bidimensional correspondente à secção do Posto A do quebramar, para ser testado no tanque de ondas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Nesta comunicação serão apresentados, para além do enquadramento geral do problema que suscitou os testes em modelo físico, a análise dos ensaios efectuados na 1^a fase com agitação regular, a análise dos ensaios efectuados na 2^a fase com agitação irregular e com blocos de alta densidade e respectiva comparação com os ensaios da 1^a fase, e por fim algumas conclusões e recomendações para a melhoria do comportamento e reabilitação do quebramar norte do Porto de Leixões.

Introdução

O porto de Leixões localiza-se na costa oeste portuguesa a cerca de 4,5 km da embocadura do rio Douro, figura 1. A primeira fase da construção do porto, implantado na foz do rio Leça teve o seu início em 1882 e terminou em 1892. Ao longo do seu período de exploração e para fazer face a novas exigências, o porto sofreu diversas obras de ampliação de onde se destaca a escavação das docas interiores, o prolongamento e posterior alteamento do quebramar norte e a construção do quebramar submerso de protecção da cabeça do quebramar norte, figura 2.



Figura 1 – Vista aérea do porto e dos terminais petroleros.

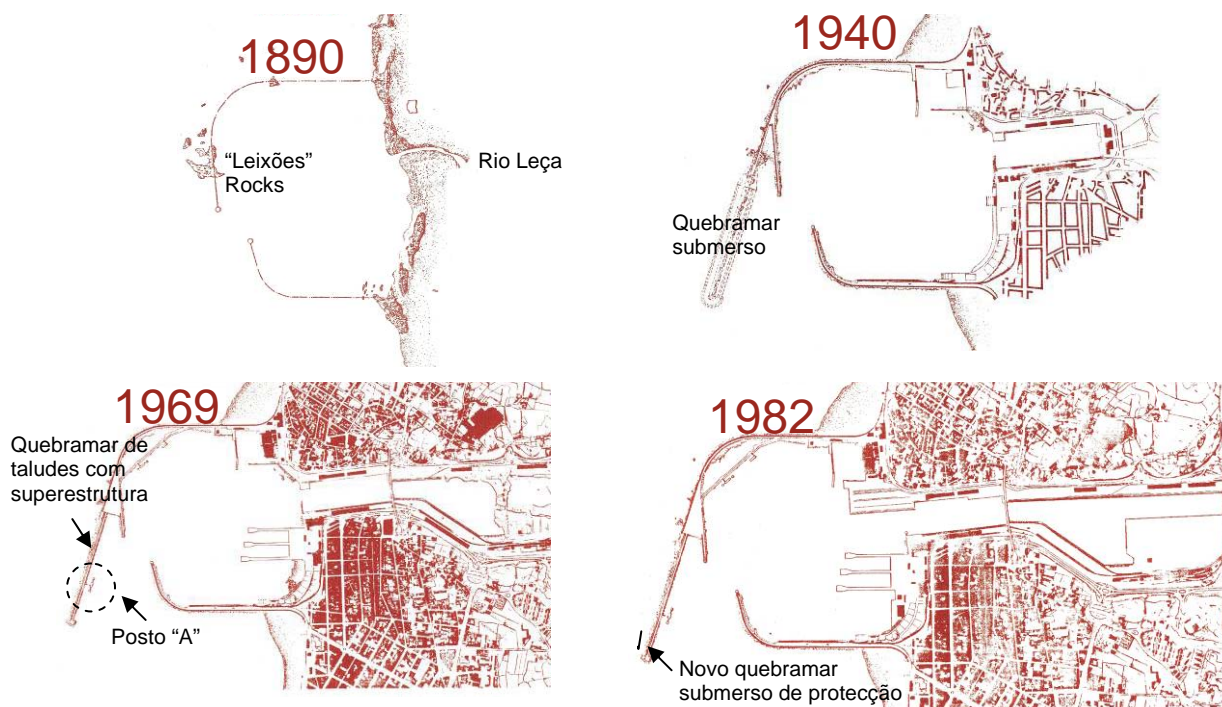


Figura 2 – Evolução geral do porto de Leixões.



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Este porto representa cerca de 25 % do comércio externo português, sendo o maior da zona norte do País e uns dos mais importantes a nível nacional.

Vários foram os temporais que atingiram os molhes de protecção do porto desde a sua construção, tendo o de Fevereiro de 1979 levado à destruição da cabeça do quebramar, figura 3, cuja reconstrução terminou em 1982, com a construção adicional de um quebramar submerso para sua protecção.

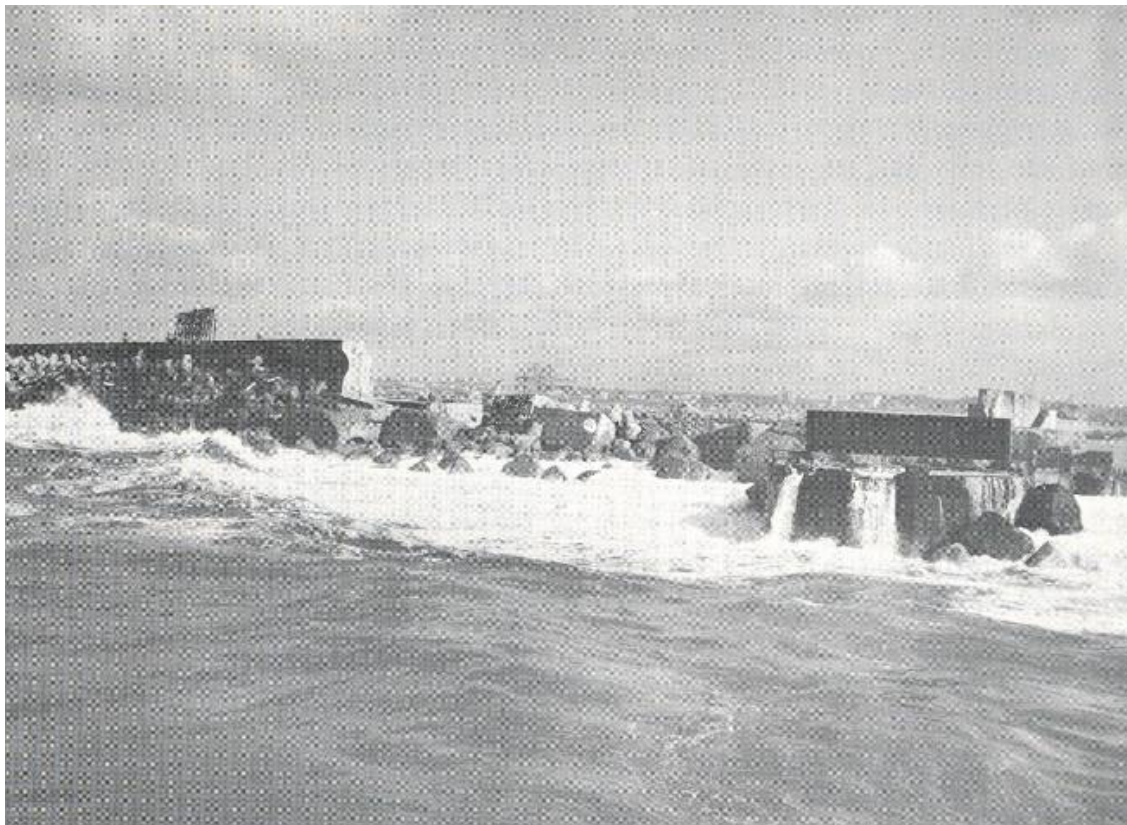


Figura 3 – Destruição da cabeça do quebramar no temporal de Fevereiro de 1979.

(Brogueira-Dias, 1979).

A operacionalidade do terminal petrolífero do porto de Leixões, está fortemente dependente da eficiência do quebramar norte, nomeadamente em termos de níveis de galgamentos e da transmissão da agitação para o interior da área portuária. A energia das ondas difractadas pode também ter um papel importante. Como tal, a melhoria das condições de operacionalidade do porto, constitui um importante objectivo da Administração Portuária, sendo também de importância fulcral para a entidade que explora o terminal petrolífero.

De forma a contribuir para essa melhoria de operacionalidade, estão em curso diversos estudos. Numa primeira fase foram realizados ensaios bidimensionais no tanque de ondas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com o actual perfil transversal e 10 outras soluções alternativas. Com estes ensaios pretendia-se analisar os níveis de galgamentos e da estabilidade da estrutura, em particular dos blocos do manto resistente. Para cada um dos testes efectuados foram adquiridos os registos da variação da superfície livre da água mas imediações da estrutura, registos fotográficos e vídeo, bem como o volume de água que galgou a estrutura.

Numa segunda fase procurou-se testar com agitação irregular e blocos de alta densidade as hipóteses que se mostraram mais eficazes na primeira fase em termos de redução dos galgamentos e melhoria da estabilidade.

Instalação Experimental e Realização dos Ensaios

Testes Realizados com Agitação Regular

O tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem 28,0 m de comprimento, 12,0 m de largura e cerca de 1,0m de profundidade. O canal utilizado para os ensaios bidimensionais foi materializado no interior no tanque através da implantação de uma parede divisória a todo o comprimento do tanque a uma distância de 0,5 m da parede lateral.

Todos os elementos constituintes do quebramar foram reproduzidos à escala 1:60, designadamente a superestrutura, os tetrápodes de 40 t, os blocos cúbicos de 90 t, etc. Para a construção das sub-camadas interiores, foram seleccionados cuidadosamente os materiais de forma a respeitarem a escala definida, figura 4 e figura 5.

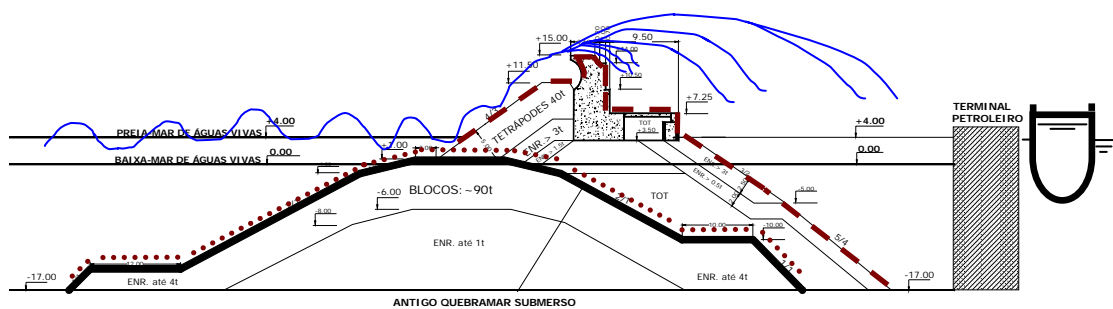


Figura 4 – Perfil transversal de projecto com o quebramar submerso de protecção da cabeça do quebramar. (Pontado – 1º fase (1940); traço interrompido – 2º fase (1969)).

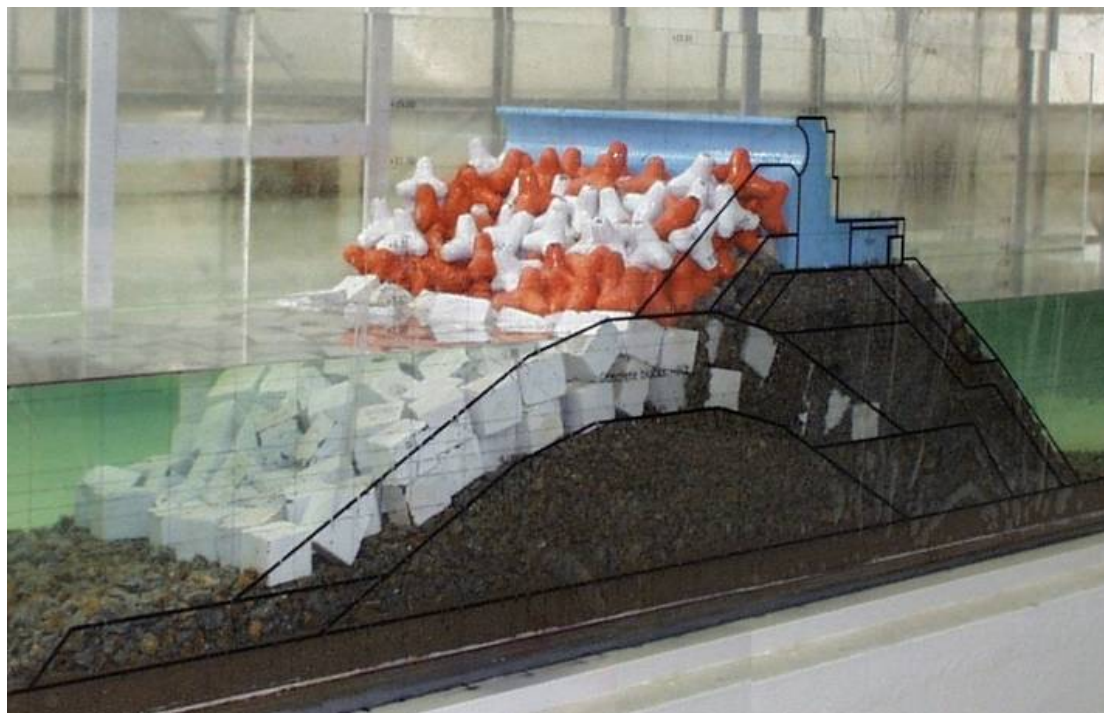


Figura 5 – Modelo construído de acordo com o projecto.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

A figura 6 apresenta as 11 hipóteses testadas com agitação regular. As suas principais características são:

- Hipótese A Estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota $-20,0$ m;
- Hipótese B Estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota $-20,0$ m e batimetria exterior de acordo com levantamento topo-hidrográfico de Maio de 2005;
- Hipótese C Estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota $-20,0$ m e batimetria exterior de acordo com levantamento topo-hidrográfico 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 $+0,0$ m (Z.H.);
- Hipótese D Estrutura base correspondente à situação actual, com fundação à cota $-20,0$ m e batimetria exterior de acordo com levantamento topo-hidrográfico de 2003, protegida com um quebramar submerso de acordo com as características da estrutura que protege a cabeça do quebramar Norte do Porto de Leixões. Cota do coroamento igual a $+2,0$ m (Z.H.);
- Hipótese E Idêntica à Hipótese B mas com uma berma aderente com o coroamento sensivelmente à cota $+4,0$ m, com blocos de 90 tf;
- Hipótese F Idêntica à Hipótese E mas com o coroamento sensivelmente à cota $+7,0$ m (Z.H.) (porosidade de 5%);
- Hipótese G Idêntica à Hipótese F mas com uma densidade de colocação dos blocos menor (porosidade de 26%);
- 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;

Desta forma, foram testados sob agitação regular 11 perfis transversais diferentes, cujo comportamento foi posteriormente analisado. Para cada perfil transversal foram testados pelo menos 2 níveis de maré ($+2,0$ m e $+4,0$ m Z.H.), e três períodos de onda diferentes (13,16 e 20 s) definidos com base em ensaios anteriores (Vera Cruz, 1993) e para cada período, diferentes alturas de onda.

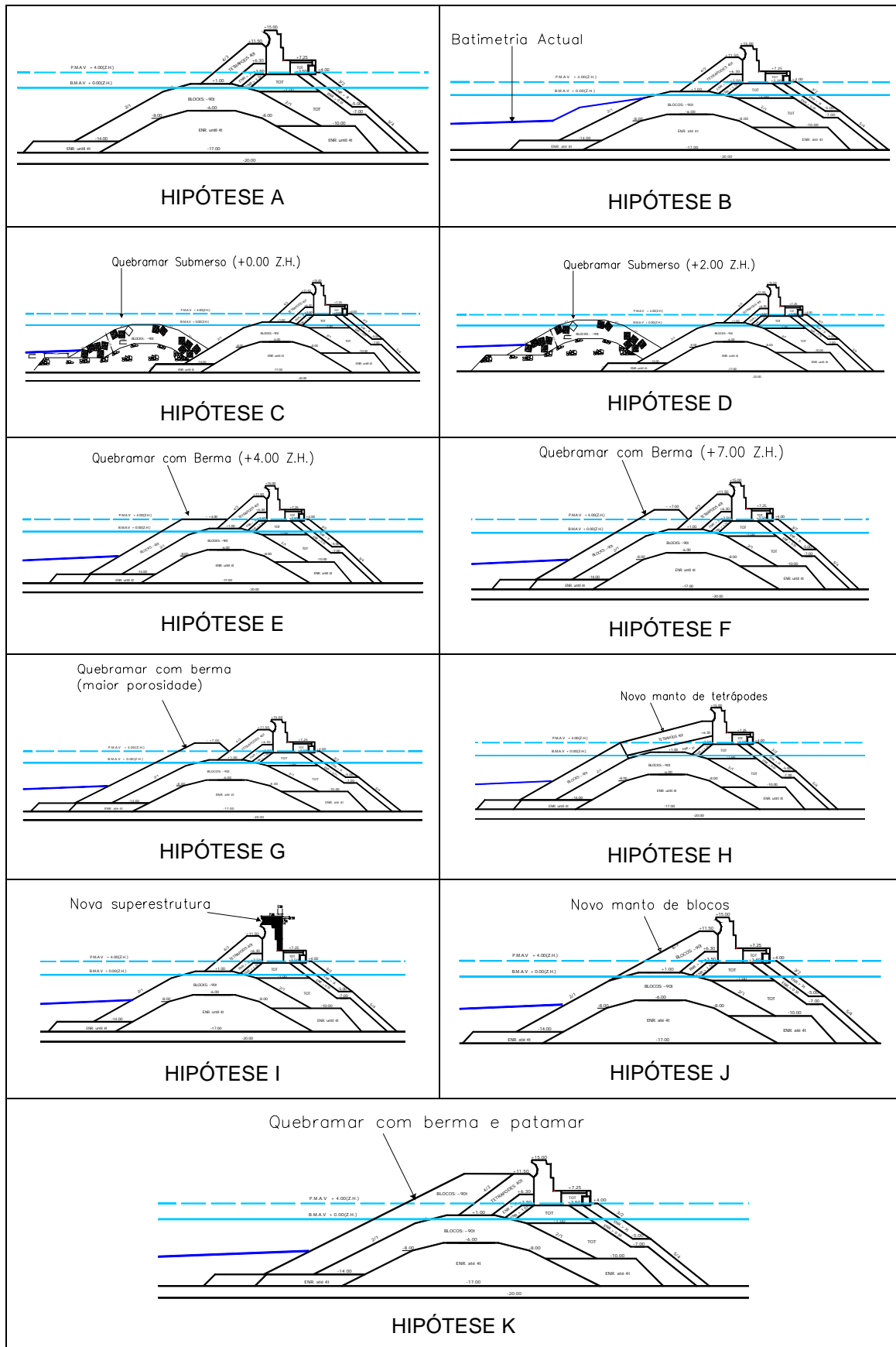


Figura 6 – Hipóteses testadas.

A sequência de testes adoptada para cada perfil transversal, foi a de alturas de onda e períodos crescentes para cada nível de maré. Na tabela 1 apresenta-se o intervalo de valores utilizados nos testes.

Tabela 1 – Características dos testes.

Intervalo de Alturas de Onda (Regulares) no Protótipo (H-m)	Períodos de onda no Protótipo (T-s)	Níveis de Maré no Protótipo (m)	Intervalo de Alturas de Onda no Modelo (H-m)	Períodos de onda no Modelo (T-s)
6.0 – 13.0	13, 16, 20	+2.0; +4.0	0.1 - 0.22	1.68; 2.07; 2.58

Quando se pretende estudar a estabilidade das estruturas, a duração efectiva de cada ensaio deverá ser superior a 300 ondas, e a sequência deverá ser crescente em termos de níveis de maré, alturas de onda e períodos. Com essa metodologia são de esperar danos acumulados. No presente estudo, um total de 4096 registos (intervalo entre aquisições de 1/8 do período da onda) foram adquiridos em cada teste, totalizando o registo de 512 ondas regulares em cada um dos ensaios.

Para a recolha do volume de água resultante do galgamento da estrutura, foi construído um recipiente em perspex, devidamente graduado, e que foi acoplado à superestrutura, figura 7. Nos casos em que a capacidade máxima do recipiente foi atingida, registou-se o tempo total de enchimento, caso contrário registava-se o volume no final de cada teste. Estes valores permitiram calcular o caudal médio de galgamento para cada situação testada.

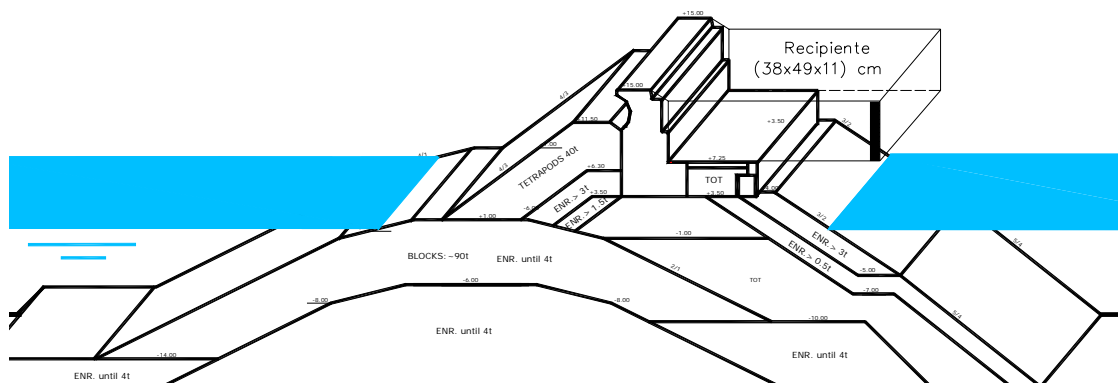


Figura 7 – Recipiente utilizado para armazenar o volume de água resultante do galgamento.

Testes Realizados com Agitação Irregular

Após a 1^a fase de ensaios, foram seleccionadas 3 hipóteses (Hipótese G, J e D), figura 8, que pelo seu comportamento mereceram um estudo mais aprofundado. Estes perfis transversais foram novamente ensaiados, mas desta vez utilizando agitação irregular e em alternativa aos blocos de densidade normal (amarelos) anteriormente utilizados, blocos de alta densidade com a mesma dimensão dos anteriores mas mais pesados (vermelhos) e outros ainda com o mesmo peso que os de densidade normal mas mais pequenos (azuis), figura 9.

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



Figura 8 – Hipóteses G, J e D.



Figura 9 – Comparação entre os blocos de densidade normal (amarelos) e os de alta densidade (vermelhos e azuis).

Análise dos Resultados

Ensaios com Agitação Regular

A figura 10 apresenta algumas imagens retiradas do registo vídeo 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.

Na figura 11 e tabela 2 encontram-se compilados os resultados obtidos para cada um dos perfis transversais para o nível de maré +4.0 m Z.H. (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 direito. O número de blocos deslocados refere-se a tetrápodes (nas hipóteses A a I) e aos blocos cúbicos (hipóteses J e K), respectivamente.

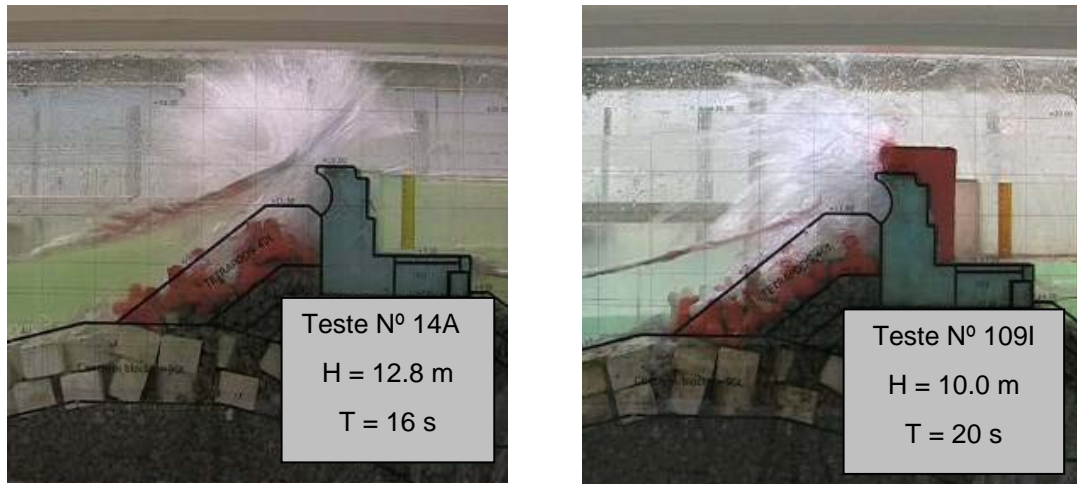


Figura 10 – Episódios de galgamentos.

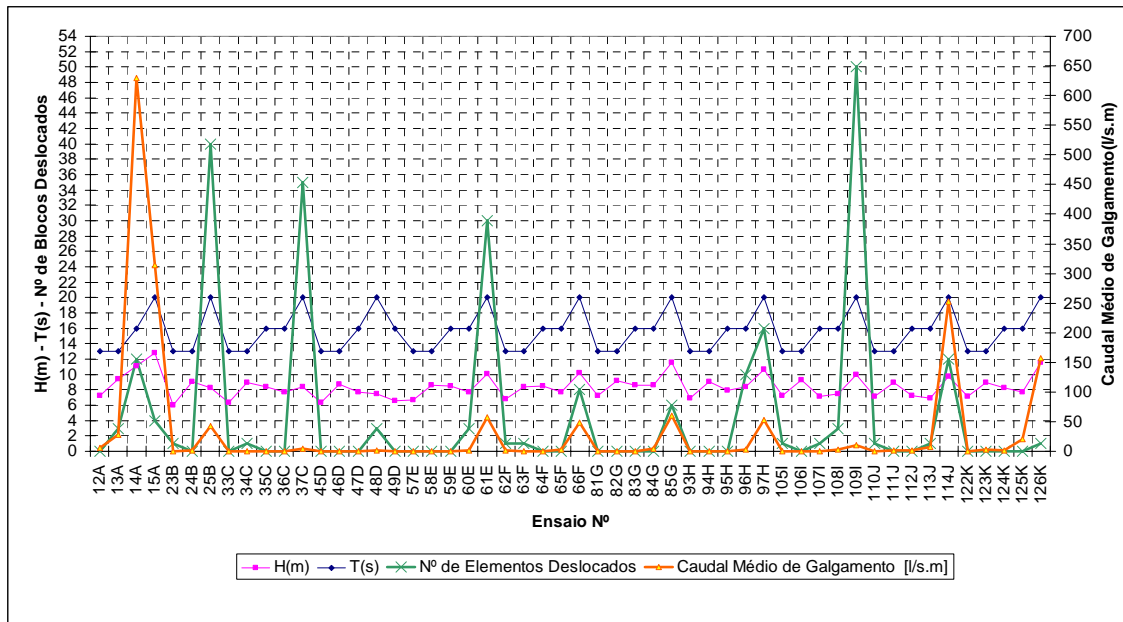


Figura 11 – Resultados dos ensaios efectuados para o nível de maré +4.0m Z.H.

(Nota: O teste 12A refere-se ao teste número 12 para a hipótese A).

Relativamente à reflexão da estrutura, foram realizados diversos testes para analisar a energia reflectida (E_r' na figura 12) 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 (E_r na figura 12). Devido à configuração da secção de teste, a energia reflectida pelo modelo, foi suficientemente dissipada por difracção, na entrada do pequeno canal de ensaio (E_r'' na figura 12), conduzindo a valores da energia reflectida muito reduzidos junto ao gerador de ondas.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Tabela 2 – Resultados dos ensaios para o nível de maré +4.0 m Z.H.

(Nota: O teste 5A refere-se ao teste número 5 para a hipótese A)

Teste Nº	Dados da Agitação no Protótipo	Altura de Onda Incidente Média Medida	Nº de Blocos Deslocados	Caudal Médio de Galgamento (Protótipo)
	T(s)	(m)		(l/s.m)
12A	13	7.3	0	5.31
13A	13	9.4	3	28.60
14A	16	11.1	12	629.24
15A	20	12.8	4	314.62
23B	13	6.0	1	0.00
24B	13	9.1	0	1.02
25B	20	8.3	40	41.95
33C	13	6.3	0	0.00
34C	13	9.0	1	0.00
35C	16	8.3	0	0.00
36C	16	7.7	0	0.00
37C	20	8.4	35	3.90
45D	13	6.3	0	0.00
46D	13	8.7	0	0.00
47D	16	7.7	0	0.00
48D	20	7.4	3	1.43
49D	16	6.6	0	0.00
57E	13	6.7	0	0.00
58E	13	8.6	0	0.00
59E	16	8.5	0	0.00
60E	16	7.8	3	2.07
61E	20	10.1	30	57.20
62F	13	6.8	1	0.82
63F	13	8.4	1	0.41
64F	16	8.4	0	0.32
65F	16	7.7	0	3.02
66F	20	10.2	8	48.40
81G	13	7.2	0	0.00
82G	13	9.2	0	0.00
83G	16	8.6	0	0.00
84G	16	8.6	0	3.81
85G	20	11.5	6	59.93
93H	13	6.9	0	0.00
94H	13	9.1	0	0.00
95H	16	8.0	0	0.00
96H	16	8.4	10	3.17
97H	20	10.6	16	52.44
105I	13	7.3	1	0.00
106I	13	9.2	0	0.00
107I	16	7.2	1	0.00
108I	16	7.4	3	2.23
109I	20	10.0	50	10.40
110J	13	7.1	1	0.31
111J	13	9.0	0	1.02
112J	16	7.3	0	1.03
113J	16	7.0	1	6.83
114J	20	9.8	12	251.70
122K	13	7.1	0	0.00
123K	13	8.9	0	3.06
124K	16	8.3	0	1.43
125K	16	7.7	0	20.97
126K	20	11.6	1	157.31

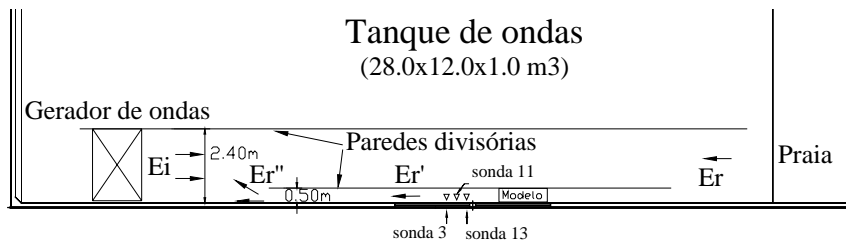


Figura 12 – Secção do tanque de ondas utilizada nos ensaios.
Representação esquemática da dissipação da energia reflectida.

Ensaios com Agitação Irregular e Blocos de Alta Densidade

Na figura 13 e tabela 3 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 Z.H. (mais desfavorável), sendo possível observar as alturas e períodos das ondas, o número de blocos deslocados, e o caudal médio de galgamento. De referir que, na tabela 3, a cor apresentada indica o tipo de bloco utilizado em cada ensaio. Note-se que também nesta fase foi utilizada agitação regular para comparação com a série de testes anterior, como é possível verificar na tabela 3. As condições de agitação podem ser lidas no eixo vertical esquerdo da figura 13 (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.

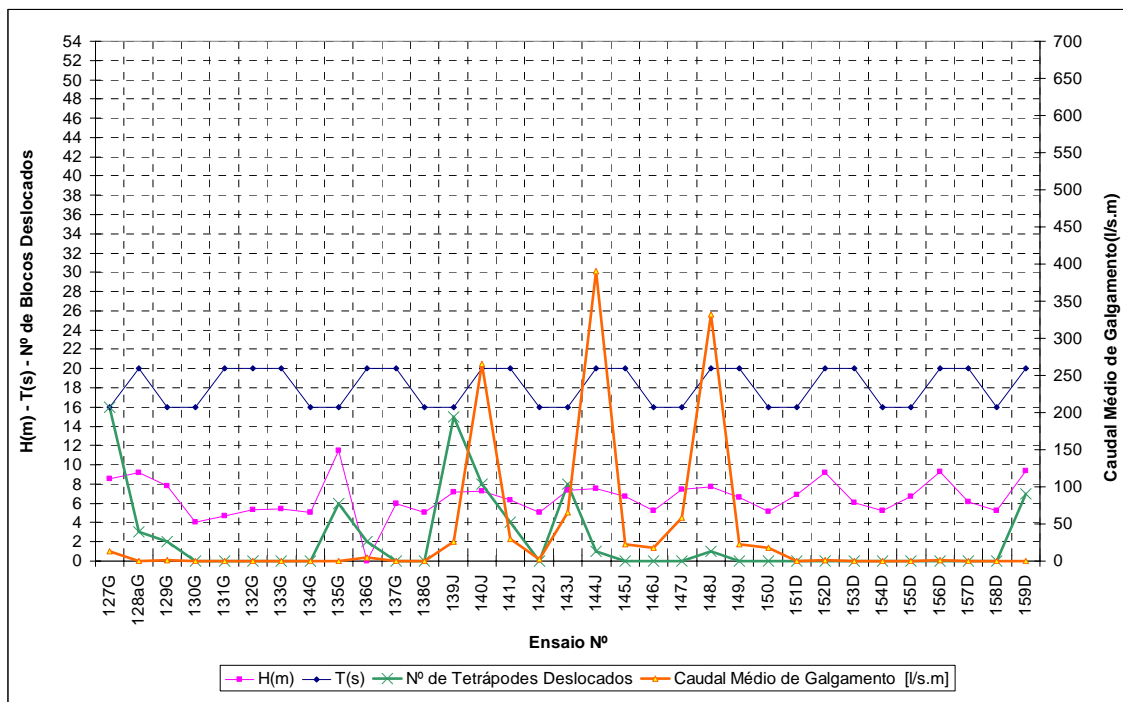


Figura 13 – Resultados dos ensaios efectuados para o nível de maré +4.0 m Z.H., com blocos de alta densidade e agitação regular e irregular.
(Nota: O teste 127G refere-se ao teste número 127 para a hipótese G).



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Tabela 3 – Resultados dos ensaios efectuados para o nível de maré +4.0 m Z.H. com blocos de alta densidade e agitação regular e irregular. (Nota: O teste 127G refere-se ao teste número 127 para a hipótese G).

Teste Nº	Dados da Agitação no Protótipo	Tipo de agitação R = regular I = irregular	Altura de Onda Incidente Média Medida	Nº de Blocos Deslocados	Caudal Médio de Galgamento (Protótipo)
	T(s)		(m)		(l/s.m)
127G	16	R	8.5	16	12.5
128aG	20	R	9.2	3	0.0
129G	16	R	7.8	2	1.7
130G	16	I	4.1	0	0.0
131G	20	I	4.7	0	0.0
132G	20	I	5.3	0	0.1
133G	20	I	5.5	0	0.4
134G	16	I	5.1	0	0.0
135G	16	R	11.5	6	0.0
136G	20	R	8.44	2	4.5
137G	20	I	6.0	0	0.4
138G	16	I	5.0	0	0.2
139J	16	R	7.2	15	25.7
140J	20	R	7.2	8	265.1
141J	20	I	6.4	4	30.1
142J	16	I	5.0	0	1.8
143J	16	R	7.3	8	65.3
144J	20	R	7.5	1	390.2
145J	20	I	6.7	0	23.0
146J	16	I	5.2	0	18.1
147J	16	R	7.5	0	57.7
148J	20	R	7.7	1	332.2
149J	20	I	6.6	0	22.4
150J	16	I	5.1	0	18.1
151D	16	R	6.9	0	0.3
152D	20	R	9.2	0	1.1
153D	20	I	6.1	0	0.1
154D	16	I	5.2	0	0.0
155D	16	R	6.7	0	0.4
156D	20	R	9.3	0	1.1
157D	20	I	6.2	0	0.1
158D	16	I	5.2	0	0.0
159D	20	R	9.3	7	0.5

Conclusões

Ensaio com Agitação Regular

Da análise dos resultados pode concluir-se 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 Z.H. como seria de esperar. Para essas situações, os resultados mostram que a Hipótese D (quebramar submerso com coroamento à cota +2.0 m Z.H.) 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 o rebentamento das ondas. A existência da bacia de dissipação mostrou-se fundamental especialmente para os períodos mais elevados, onde as



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

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 barlamar 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.

Ensaio com Agitação Irregular e Blocos de Alta Densidade

Da análise dos resultados dos 3 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 1^a fase.

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.

Relativamente à utilização de blocos de alta densidade, parece existir uma tendência para os blocos azuis (blocos de alta densidade com o mesmo peso que os de densidade normal) se mostrarem mais eficazes em termos de galgamentos enquanto os blocos vermelhos (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

Este estudo encontra-se ainda em curso, e antes de qualquer intervenção será necessário construir a uma escala maior um modelo tridimensional da(s) hipótese(s) que se julgar(em) mais promissora(s).



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Referências Bibliográficas

IHRH, Estudo Sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petrolero do Porto de Leixões, Relatório de Modelação Física, Volumes 1 a 3, Porto, Portugal, Outubro 2004.

Taveira Pinto, F., Análise Das Oscilações E Dos Campos De Velocidades Nas Imediações De Quebramares Submersos, Sob A Acção Da Agitação Marítima, Tese de Doutoramento, FEUP, Maio 2002.

Vera-Cruz, D., Reis de Carvalho, J., 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, Portugal, 1993.

Internet Links

www.apdl.pt