

## **Galgamento de uma estrutura portuária protegida por um quebra-mar submerso: o caso do Porto de Leixões, Portugal\***

Miguel Bairrão<sup>a</sup>; Maria da Graça Neves<sup>@, a</sup>; Maria Teresa Reis<sup>a</sup>; Francisco Taveira Pinto<sup>b</sup>

### **RESUMO**

O galgamento de estruturas portuárias consiste na passagem de água sobre o coroamento da estrutura pela ação da agitação marítima e é um dos fenómenos com maior impacto na integridade da estrutura e na segurança da zona por ela protegida. O principal objetivo deste trabalho é estudar o galgamento num quebra-mar de taludes, com um importante muro cortina, protegido por um quebra-mar submerso. Em particular, pretende-se otimizar a geometria do quebra-mar submerso situado a bar-lamar do quebra-mar de taludes, no qual se pretende diminuir o galgamento.

A estrutura marítima em estudo é o molhe norte do Porto de Leixões, em frente ao qual já existe um quebra-mar submerso na zona da cabeça. Pretende-se estender a zona do molhe protegida pelo quebra-mar submerso e, para tal, é necessário estudar qual a melhor geometria e posição a adotar para este quebra-mar.

Para estudar a influência da geometria e da posição do quebra-mar submerso no galgamento do molhe norte, utilizou-se o modelo numérico IH2VOF. Simularam-se três condições de agitação regular, que diferem somente na altura de onda, e sete geometrias do quebra-mar submerso, que diferem da configuração original (a existente atualmente) em três características: a distância entre o quebra-mar submerso e o molhe, a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a sua largura de coroamento.

Com a realização deste estudo, para as condições de agitação consideradas, verificou-se que as características com maior impacto na redução do galgamento no molhe norte do Porto de Leixões são: o aumento da distância entre o quebra-mar submerso e o molhe e o aumento da cota de coroamento do quebra-mar submerso. O caudal médio de galgamento para as condições de agitação em estudo reduziu-se de um valor máximo de 0,71 l/s/m para a configuração original para 0,02 l/s/m em duas das novas configurações analisadas, ou seja, uma redução de 97% face à configuração original.

**Palavras-chave:** Modelação numérica, IH2VOF, modelação física

@ Corresponding author to whom correspondence should be addressed

<sup>a</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, +351.91.9253368. e-mails: Bairrão <m.bairrao@campus.fct.unl.pt>; Neves <gneves@lnec.pt>; Reis <treis@lnec.pt>.

<sup>b</sup> Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP), Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, +351.22.5081966, e-mail: <fpinto@fe.up.pt>.

\* Submission: 16 DEZ 2014; Peer review: 1 FEB 2015; Revised: 11 SEP 2015; Accepted: 15 OCT 2015; Available on-line: 19 OCT 2015

This article contains supporting information online at [http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-568\\_Bairrao\\_Supporting-Information.pdf](http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-568_Bairrao_Supporting-Information.pdf)



**ABSTRACT**

*Overtopping of a harbour structure protected by a submerged breakwater: Leixões Harbour, Portugal*

*Overtopping of port structures, which is the passage of water over the structure crest due to wave action, is one of the phenomena that has the greatest impact on the structure integrity and on the safety of the protected area. The main goal of this research is to study the wave overtopping of a rubble-mound breakwater, with an important wave return wall, protected by a submerged breakwater. In particular, the study aims to optimize the geometry of the submerged breakwater located in front of the rubble-mound breakwater, in order to reduce its overtopping.*

*The studied structure is the northern breakwater of the Port of Leixões, Portugal, which is already protected by a submerged breakwater near the port entrance. The study proposes to extend the protected zone of the northern breakwater. In order to do so, it is necessary to analyse the best geometry for this submerged breakwater and its distance to the protected structure.*

*To study the influence of the submerged breakwater geometry and location on the overtopping of the rubble-mound breakwater the IH2VOF model was used. Three regular wave conditions were studied, with different wave heights only. Seven geometries for the submerged breakwater were considered, which differed from the original configuration (the geometry which already exists) in three characteristics: the distance between the submerged and the main breakwaters and the submerged breakwater crest level and width.*

*For the wave conditions considered, the characteristics that had the greatest impact on reducing the overtopping of the main breakwater of the Port of Leixões were: the increase of the distance between the submerged and the main breakwaters and the increase of the crest level of the submerged breakwater. The mean overtopping discharge for the studied wave conditions was reduced from a maximum value of 0.71 l/s/m for the original configuration to 0.02 l/s/m in two of the analysed new configurations, which corresponds to a 97% overtopping reduction compared to the original configuration.*

**Keywords:** Numerical modelling, IH2VOF, physical modelling

**1. Introdução**

O molhe norte do Porto de Leixões (Figuras 1 e 2), que está localizado no litoral norte de Portugal, protege o atual segundo maior porto artificial, representando cerca de 25% do comércio internacional português com, aproximadamente, 17,2 milhões de toneladas de mercadorias movimentadas em 2013 ([www.apdl.pt](http://www.apdl.pt)).

O molhe tem sido alvo de diversos estudos (por exemplo, Pinto, 2001, Gomes *et al.*, 2009), na tentativa de resolver problemas associados ao elevado número de dias por ano em que é galgado.

De modo a mitigar estes problemas, foi proposta a construção de um quebra-mar submerso em frente ao quebra-mar existente. A definição das dimensões e características do quebra-mar submerso, assim como a sua posição em relação à estrutura a proteger, são

alguns dos parâmetros a definir, tendo em conta possíveis restrições ambientais e económicas.

Para aprofundar os conhecimentos acerca do comportamento hidrodinâmico na vizinhança do quebra-mar submerso e melhorar o seu dimensionamento, realizaram-se ensaios bidimensionais e foram aplicados modelos numéricos.

O objetivo principal do presente estudo consistiu na análise numérica do galgamento do molhe norte do Porto de Leixões, quando sujeito a condições de agitação caracterizadas por elevadas alturas de onda, casos não abordados em estudos anteriores desenvolvidos no âmbito do projeto de investigação DESTAQ (Gadelho *et al.*, 2011). Esta análise é realizada para sete configurações diferentes do quebra-mar submerso localizado a barlamar do molhe norte.



Figura 1 - Localização do molhe norte do Porto de Leixões.

Figure 1 - Location of the northern breakwater of Leixões Harbour.

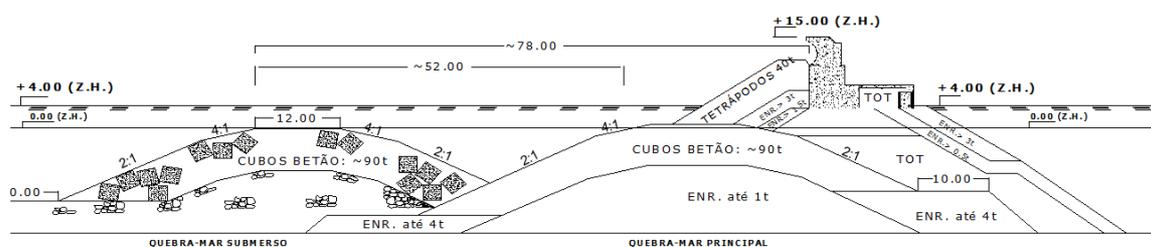


Figura 2 - Seção transversal do molhe norte do Porto de Leixões.

Figure 2 - Cross-section of the northern breakwater of Leixões Harbour.

## 2. Modelo numérico

### 2.1. Considerações gerais

O modelo numérico IH2VOF (ver *Supporting Information I*) foi desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria com base no modelo original COBRAS (Cornell Breaking Waves and Structure) que, por sua vez, foi desenvolvido na Universidade de Cornell especificamente para tratar do fenómeno da rebentação e ter em conta as estruturas porosas (Lin & Liu, 1998).

### 2.2. Geometria de estudo e características dos meios porosos

A geometria do caso de estudo é introduzida no modelo através da informação da posição da superfície livre, da geometria das estruturas impermeáveis e da geometria dos meios porosos.

Relativamente aos meios porosos é necessário definir, para além da geometria, cinco parâmetros:

- Porosidade ( $n$ ): definida pela razão entre o volume de poros e o volume total de uma amostra;
- Coeficiente de atrito linear ( $\alpha$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de atrito não linear ( $\beta$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de massa adicionada ( $\gamma$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Diâmetro nominal ( $D_{50}$ ): Diâmetro característico do material que constitui o meio.

### 2.3. Cálculo do galgamento

No cálculo do caudal médio de galgamento recorre-se, primeiramente, a uma integração das velocidades entre dois pontos da estrutura galgada para obter o caudal instantâneo por metro linear de estrutura. De seguida, realiza-se uma integração do caudal instantâneo (resultante da primeira integração) durante o intervalo de tempo em que se pretende calcular o galgamento. Por fim, divide-se o resultado pelo intervalo de tempo considerado e obtém-se o caudal médio de galgamento.

Assim sendo, o caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura pode ser obtido através dos

resultados do modelo IH2VOF, recorrendo à seguinte equação:

$$Q = \frac{1}{\Delta t} \iint_{y_1}^{y_2} u(x, y, t) dy dt \quad (1)$$

em que  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo em que se pretende calcular o galgamento,  $y_1$  e  $y_2$  são, respetivamente, os limites inferior e superior da lâmina de água que galga a estrutura num dado instante de tempo, e  $u$  é a velocidade no ponto da malha considerado nesse instante de tempo (Figura 3).

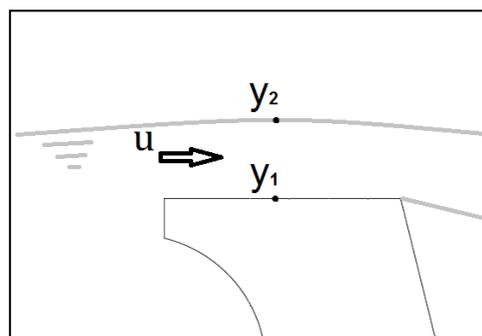


Figura 3 – Cálculo do galgamento com base nos resultados do IH2VOF

Figure 3 – Calculation of overtopping based on IH2VOF results.

## 3. Caso de estudo

### 3.1. Condições de agitação marítima local

O molhe norte do Porto de Leixões encontra-se numa zona de forte agitação marítima, com a ocorrência de elevadas alturas de onda ( $H$ ) e períodos ( $T$ ). Para caracterizar a agitação marítima, recorreu-se à boia ondógrafo localizada na batimétrica dos -83 m (ZH), nas proximidades do Porto de Leixões, que regista os valores da agitação desde 1993 e onde se verificou que as ocorrências de ondas com períodos de pico entre 15 s e 20 s e com alturas significativas de onda maiores que 5 m correspondem a 1,1% dos dias do ano (ver *Supporting Information II*). Estas são as gamas de valores de  $T_p$  e de  $H_s$  das quais se extraíram os valores simulados no presente estudo e que são caracterizadas por elevadas alturas de onda (entre 8 m e 10 m) associadas a um elevado período (20 s), casos não abordados ante-

riormente no âmbito do projeto DESTAQ (Gadelho *et al.*, 2011, Lopes *et al.*, 2013, Neves *et al.*, 2013), permitindo, assim, alargar o âmbito das condições analisadas.

### 3.2. Configurações geométricas do quebra-mar submerso utilizadas nos modelos físico e numérico

Para selecionar a posição e dimensões do quebra-mar submerso que levariam a mitigar o galgamento no molhe norte, realizaram-se ensaios bidimensionais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) (Gomes *et al.*, 2009, Lopes *et al.*, 2013). Esses ensaios vêm sendo complementados com a aplicação, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de modelos numéricos e é nesse âmbito que se enquadra o presente trabalho.

Os ensaios em modelo físico (Figura 4) foram realizados à escala geométrica de 1/60, resultando os dados que serviram, numa fase inicial, para calibrar o modelo numérico IH2VOF.



Figura 4 - Modelo testado no Laboratório de Hidráulica da FEUP.

Figure 4 - Model tested in FEUP Hydraulics Laboratory.

As geometrias estudadas nos ensaios em modelo físico foram (Figura 5):

- **Configuração 1:** Corresponde à configuração original do molhe norte do Porto de Leixões (Figura 1), com cota de coroamento de +0,00 m (ZH). Note-se que as dimensões das configurações apresentadas na primeira imagem da Figura 5 se encontram à escala do modelo físico;
- **Configuração 2:** Corresponde à subida da cota de coroamento do quebra-mar submerso para +2,00 m (ZH);
- **Configuração 3:** Corresponde ao aumento em 50% da distância entre quebra-mares em relação à configuração original (Configuração 1);
- **Configuração 4:** Corresponde ao aumento em 50% da largura de coroamento do quebra-mar submerso em relação à configuração original (Configuração 1).

Na Figura 5 (e também na Figura 6) apresentam-se, a vermelho, as variações de geometria face à Configuração 1, que está representada com a cor preta a traçado na parte alterada. As dimensões, em metros,

indicadas nestas figuras são referentes ao sistema de eixos apresentado na Figura 7, onde a origem corresponde à posição do batedor. O nível de repouso (N.R.) corresponde ao nível de preia-mar, +4,00 m (ZH), que corresponde, no modelo, a uma profundidade de 0,35 m junto ao batedor, já que, nessa zona, o fundo se encontra a -17,00 m (ZH).

No presente estudo em modelo numérico, efetuado à escala do modelo físico, foram consideradas estas 4 configurações ensaiadas em modelo físico na FEUP e ainda mais três configurações (Figura 6):

- **Configuração 5:** Corresponde a uma redução em 25% da distância entre quebra-mares em relação à configuração original (Configuração 1);
- **Configuração 6:** Corresponde ao aumento em 50% da distância entre quebra-mares e a um aumento da cota de coroamento do quebra-mar submerso para +2,00 m (ZH), ambos em relação à configuração original (Configuração 1);
- **Configuração 7:** Corresponde ao aumento em 50% da distância entre quebra-mares e a um aumento em 50% da largura de coroamento do quebra-mar submerso, ambos em relação à configuração original (Configuração 1).

As sete configurações do quebra-mar submerso estudadas em modelo numérico diferem da configuração original (a existente atualmente) em três características: a distância entre o quebra-mar submerso e a estrutura portuária, a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a sua largura de coroamento. A escolha destas três características foi baseada na existência de estudos (Gomes *et al.*, 2009, Lopes, 2013) que concluem que os parâmetros referidos são os que têm mais influência no galgamento desta estrutura.

Os ensaios realizados na FEUP centraram-se essencialmente na análise da estabilidade do molhe norte e na medição de velocidades do escoamento, que serviram para a calibração do modelo numérico (Gadelho *et al.*, 2011). No entanto, posteriormente, foi realizado um pequeno número de ensaios com medição do galgamento que, globalmente considerou um nível de maré de +4,00 m (ZH), agitação regular e irregular (espectro JONSWAP) e três períodos,  $T$ , diferentes, de 16 s, 20 s e 24 s (em que  $T$  representa o período das ondas regulares ou o período de pico do espectro JONSWAP), (Lopes, 2013). As alturas de onda regulares ( $H$ ) variaram de 6,0 m a 12,0 m, enquanto a altura significativa da onda variou entre 4,0 m e 7,0 m (todos estes valores se referem às dimensões em protótipo). No entanto, as condições de agitação ensaiadas para cada configuração variaram entre si, o que não permite comparar diretamente o efeito no galgamento da variação das características do quebra-mar submerso. Contudo,

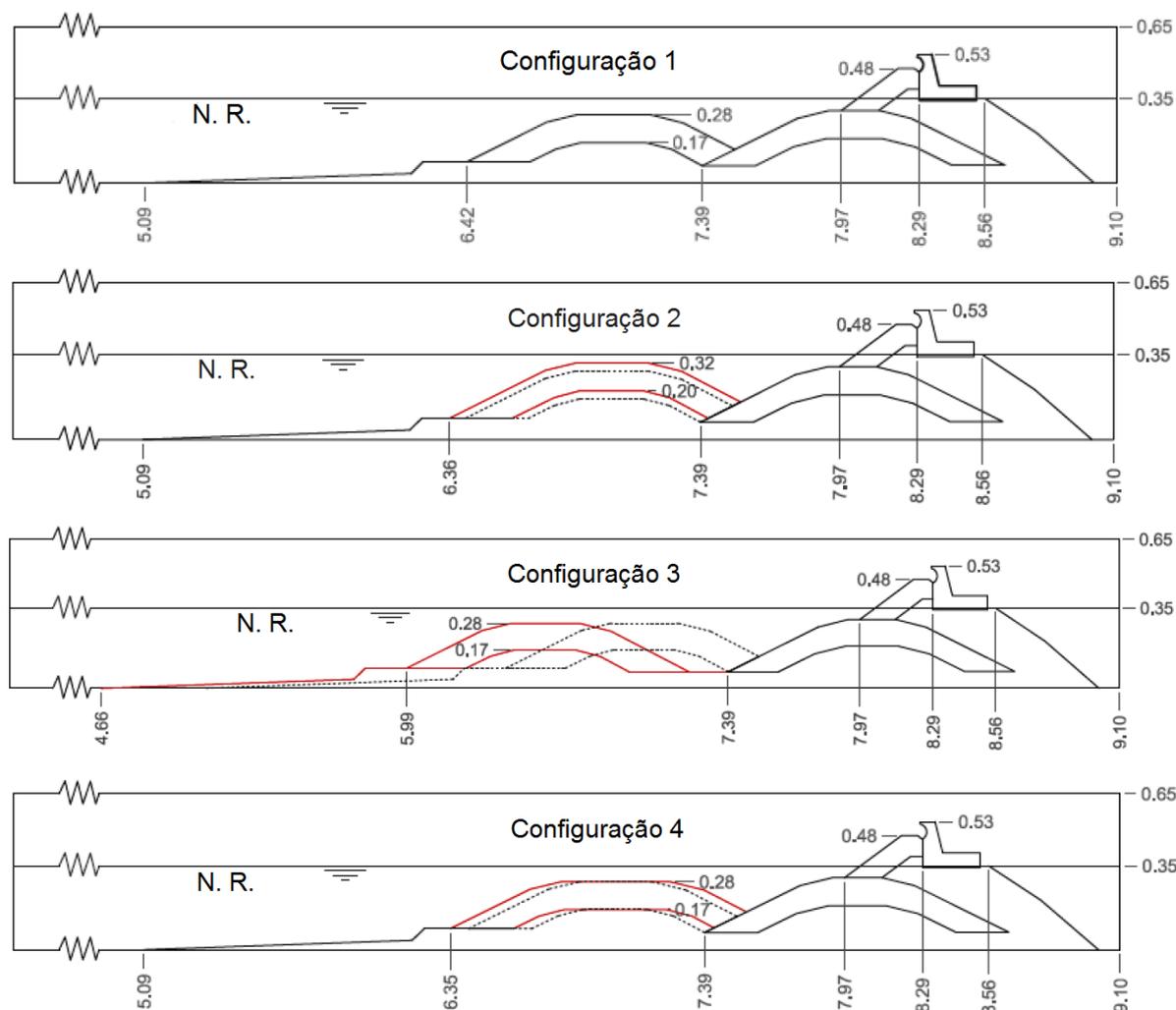


Figura 5 - Configurações estudadas nos ensaios em modelo físico (dimensões em metros, à escala do modelo).

Figure 5 - Configurations studied in the physical model tests (dimensions in meters, at model scale).

verificou-se que a Configuração 3 foi a que originou menores valores de caudal médio de galgamento (Neves *et al.*, 2013), inferiores a 0,3 l/s/m (valor de protótipo).

#### 4. Apresentação e análise de resultados

##### 4.1. Considerações gerais

Neste capítulo, apresentam-se as condições de agitação simuladas neste trabalho e os resultados das simulações com o modelo numérico para as sete configurações do quebra-mar submerso (Figuras 5 e 6). Todos os resultados são apresentados em valores do modelo físico da FEUP, a não ser que seja referido o contrário.

##### 4.2. Condições das simulações

Para analisar a influência das diferentes geometrias no fenómeno do galgamento foram consideradas três condições de agitação regular para cada uma das sete con-

figurações do quebra-mar submerso apresentadas (ver secção 3.2). Essas condições diferem somente na altura de onda, mantendo-se os valores dos restantes parâmetros. Assim, na Tabela 1, apresentam-se, quer à escala do modelo, quer em protótipo, as condições de agitação marítima e profundidade simuladas numericamente.

Tabela 1 - Condições de agitação marítima e profundidade simuladas numericamente.

Table 1 - Wave conditions and water depths simulated numerically.

	Protótipo	Modelo
Altura de onda, $H$ (m)	8	0,133
	9	0,150
	10	0,167
Período de onda, $T$ (s)	20	2,582
Profundidade, $h$ (m)	21	0,35

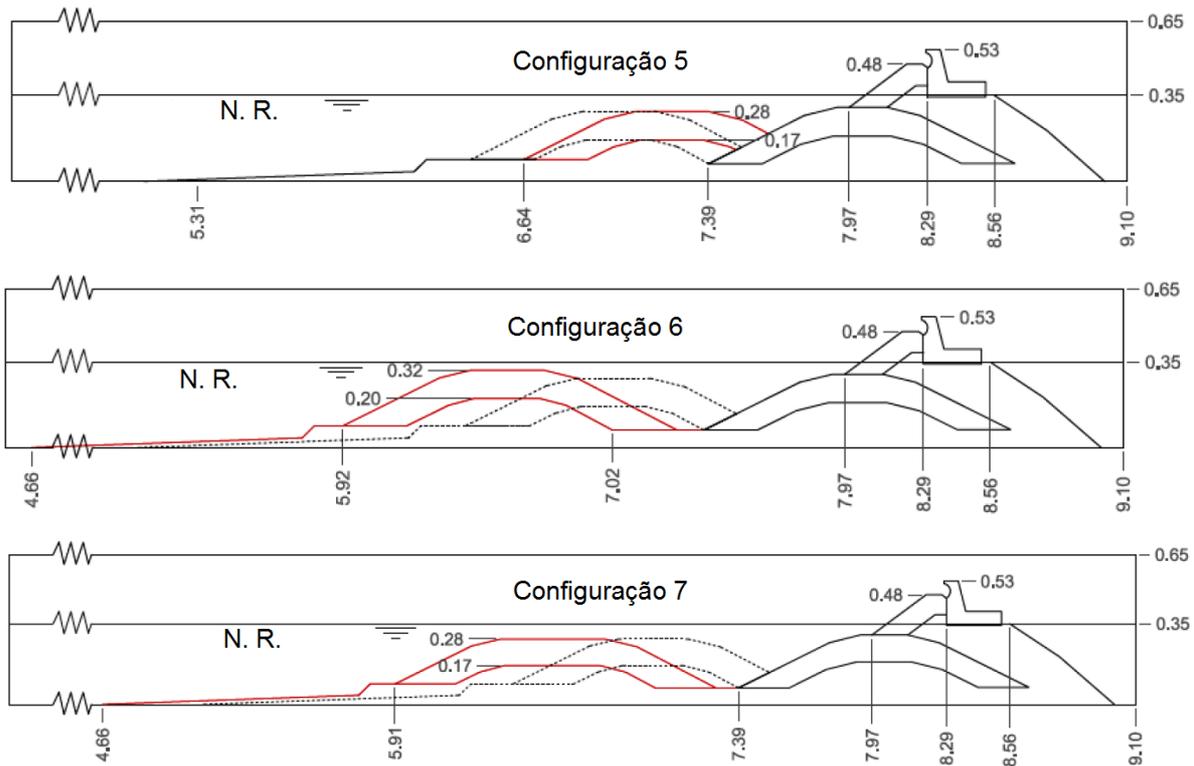


Figura 6 - Configurações estudadas em modelo numérico (dimensões em metros, à escala do modelo).

*Figure 6 - Configurations studied numerically (dimensions in meters, at model scale).*



Figura 7 - Sistema de eixos considerado.

*Figure 7 - Axis system considered.*

Para a geração da agitação no modelo numérico foi considerado um batedor estático, com um início suavizado de 5 s, e recorreu-se à teoria linear. Geraram-se ondas para uma duração de simulação de 150 s.

O domínio de cálculo para as simulações efetuadas com o modelo IH2VOF foi considerado como sendo retangular, com 0,65 m de altura e 9,1 m de comprimento e incluiu uma zona de pelo menos 4,66 m entre o início do domínio e o início da estrutura.

Este domínio foi discretizado através de uma malha estruturada, com uma zona em  $x$  e três zonas em  $y$  (ver *Supporting Information III*), com base em estudos anteriores (Gadelho *et al.*, 2011, Neves *et al.*, 2013, Bairrão, 2014) e em critérios descritos no manual do modelo (IH2VOF, 2012).

A malha utilizada no caso em estudo possui, ao longo de todo o domínio, um total de 1 301 x 201 células nas direções  $x$  e  $y$ , respetivamente, resultando num total de 261 501 células.

Relativamente às diversas características dos mantos, conforme referido na secção 2.2, devem ser definidos cinco parâmetros. Assim, para os coeficientes empíricos  $\alpha$  e  $\beta$ , existem diversos valores sugeridos na literatura, tal como se pode consultar em García (2007). No entanto, foram considerados os valores obtidos na calibração realizada anteriormente por Gadelho *et al.* (2011) baseada em comparações de superfície livre e velocidades obtidas em modelo físico. Neste documento estava também incluída a calibração da porosidade,  $n$ , do manto de tetrápodes.

Em relação aos valores do diâmetro nominal,  $D_{50}$ , e do coeficiente adimensional de massa adicionada,  $\gamma$ , foram considerados os valores de referência do modelo físico realizado na FEUP e o valor genérico dado na bibliografia (García, 2007), respetivamente.

Os valores considerados para os parâmetros referidos são os apresentados na Tabela 2, utilizando a designação dos mantos apresentada na Figura 8.

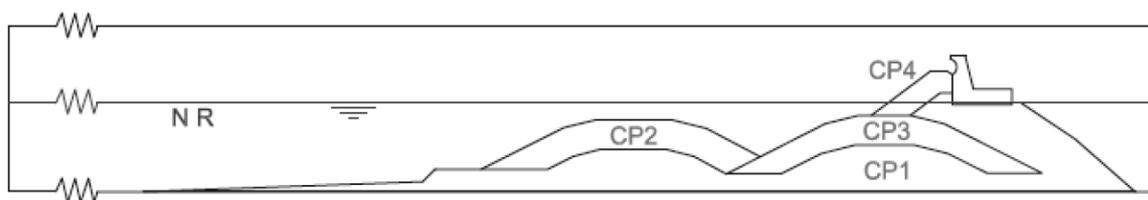


Figura 8 - Designação de cada manto poroso.

Figure 8 - Porous layers designation.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $D_{50}$  e  $\gamma$  resultantes da calibração realizada por Gadelho *et al.* (2011) para as características dos mantos porosos.

Table 2 - Values of parameters  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $D_{50}$  and  $\gamma$  resulting from the calibration performed by Gadelho *et al.* (2011) of the characteristics of the porous layers.

Designação - Manto	$n$ (%)	$\alpha$ (-)	$\beta$ (-)	$D_{50}$ (mm)	$\gamma$ (-)
CP1 - Brita	25	200	1,1	56	0,34
CP2 - Cubos	55	1000	0,5	56	
CP3 - Cubos	55	200	0,5	43	
CP4 - Tetrápodes	60	200	1,5	22	

Os resultados com interesse para o estudo são as séries temporais de superfície livre em vários pontos do domínio, aqui denominados por sondas numéricas, e que correspondem à posição das sondas utilizadas no modelo físico, e o caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura, calculado com base na equação 1 aplicada aos resultados obtidos em pontos selecionados do coroamento do muro cortina do molhe norte (ver Figura 9).

Relativamente à posição das sondas, foram colocadas 15 sondas numéricas, que são apresentadas na Figura 9, indicando-se o número de cada uma das sondas, atribuído por ordem crescente a partir da origem. As sondas 12 a 15 foram colocadas igualmente espaçadas a fim de verificar se ocorre dissipação numérica, isto é, se

o caudal médio de galgamento se mantém constante ao longo do coroamento, como esperado.

A Tabela 3 apresenta a distância de cada sonda ao sistema de eixos com origem no canto inferior esquerdo do domínio (Figura 7) e a profundidade (coluna de água) na posição de cada sonda. O galgamento médio obtido pelo programa IH2VOF é calculado com base na equação 1, aplicada aos dados das quatro sondas posicionadas no coroamento da estrutura (sondas 12 a 15, Figura 9).

### 4.3. Resultados

Relativamente aos resultados, primeiramente analisaram-se as séries temporais da superfície livre,  $\eta$ , nas primeiras 11 sondas (inclusive) em todas as simulações para determinar o tempo necessário de estabilização do modelo, isto é, onde o efeito da reflexão da onda na estrutura atingia todo o canal, o que ocorreu por volta dos 75 s. Na Figura 10 apresenta-se, para a Configuração 1 e para  $H = 0,150$  m, um exemplo da série temporal da elevação da superfície livre obtida na sonda 4, onde se pode verificar a estabilização da configuração da superfície livre a partir dos 75 s, aproximadamente.

Deste modo definiu-se o intervalo de tempo em que se calculou o galgamento e procedeu-se ao tratamento e análise de resultados entre  $80,236 < t \text{ (s)} < 149,95$ . Este intervalo corresponde a um número múltiplo do período de onda,  $T$ , e corresponde a 27 ondas.

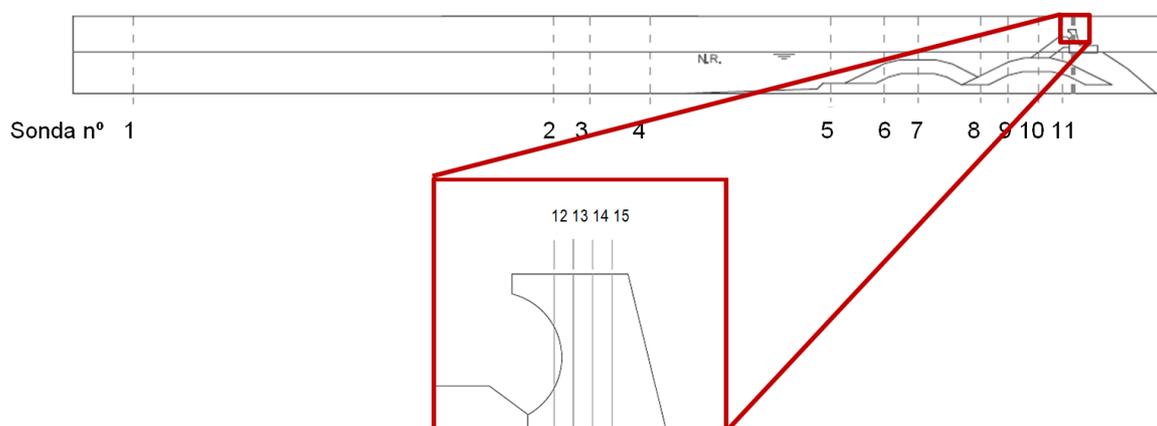


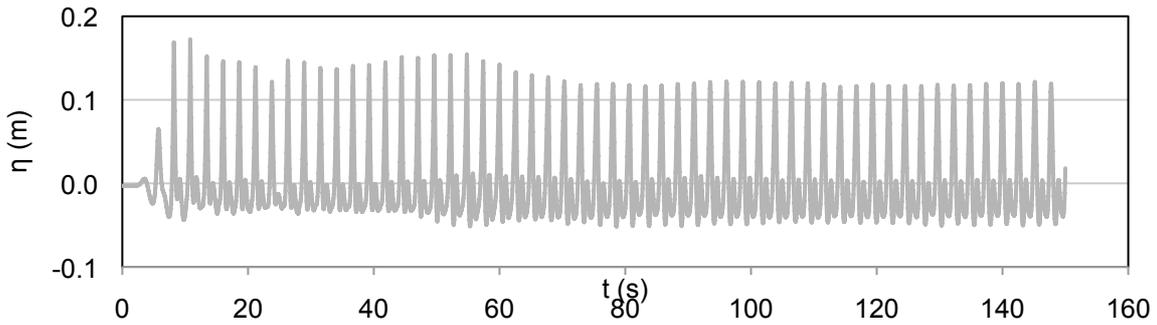
Figura 9 - Posição das sondas numéricas e físicas.

Figure 9 - Position of numerical and physical gauges.

Tabela 3 - Posição e profundidade das sondas numéricas (à escala do modelo).

Table 3 - Location and depth of the numerical gauges (model scale).

Sonda N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distância, $x$ (m)	0,50	4,00	4,30	4,80	6,30	6,75	7,03	7,53	7,78	8,03	8,23	8,30	8,31	8,32	8,33
Profundidade, $y$ (m)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,26	0,09	0,07	0,21	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 10 - Série temporal da elevação da superfície livre,  $\eta$ , na sonda 4 para a Configuração 1 com  $H = 0,150$  m.Figure 10 - Time series of free surface elevation,  $\eta$ , at gauge 4 for Configuration 1 with  $H = 0.150$  m.

Neste intervalo de tempo, e com base na equação 1 e nos resultados nas sondas 12 a 15, calculou-se o caudal médio de galgamento (ver secção 2.3.).

Na Tabela 4 apresentam-se os valores do caudal médio de galgamento por metro linear da estrutura obtidos para cada configuração e cada condição de agitação. Na Figura 11 apresentam-se graficamente os respetivos valores.

Através da Figura 11 e da Tabela 4 pode-se concluir que, para as condições de geometria da estrutura e de agitação consideradas neste estudo, a altura de onda que provoca maior galgamento é  $H = 0,150$  m. As configurações em que ocorreram maiores galgamentos foram as Configurações 1, 4 e 5, com  $Q > 0,3$  l/s/m. Nas restantes configurações o caudal nunca excedeu 0,1 l/s/m. É também visível que as configurações que, de forma global, apresentaram maior eficiência a reduzir o caudal que galga o molhe norte do Porto de Leixões são a 2 e a 6, com  $Q \leq 0,02$  l/s/m, seguidas da Configuração 3.

Neves *et al.* (2013) estudaram o galgamento para as Configurações 1 a 5 (ver Figuras 5 e 6) considerando três condições de agitação irregular com alturas significativas de onda iguais ou inferiores a 7 m e períodos de pico iguais ou inferiores a 20 s. Dos resultados obtidos, verificou-se que o parâmetro geométrico do quebra-mar submerso que mais influência tinha na redução do galgamento sobre o molhe norte era a sua cota de coroamento. Complementando esses resultados com os aqui apresentados, verifica-se que, de facto, existe um segundo parâmetro com grande influência na

redução do galgamento: a distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte.

Assim, as Configurações 2, 3 e 6 são as melhores opções para reduzir o galgamento no molhe norte para as condições em estudo. No entanto, na Configuração 6, o quebra-mar submerso está a uma maior distância do molhe norte e tem uma cota de coroamento mais elevada, o que levará a um aumento do material necessário à sua construção e, como tal, acarretará um maior custo. Para completar esta análise, observaram-se as imagens instantâneas da superfície livre obtidas pelo modelo IH2VOF correspondentes a cada uma das alturas de onda incidentes simuladas e para a Configuração 1 (ver *Supporting Information IV*). Para as alturas de onda incidentes de 0,133 m e 0,150 m é visível a ocorrência de rebentação da onda sobre o quebra-mar submerso, havendo uma dissipação de energia antes da onda atingir o molhe norte do Porto de Leixões. Estes dois casos apresentam um comportamento relativamente semelhante, ao contrário do que acontece com o caso de altura de onda incidente maior, onde é visível a ocorrência de rebentação em duas zonas antes da onda atingir o molhe norte: uma antes de atingir o quebra-mar submerso e outra sobre este quebra-mar, fazendo com que no caso com  $H = 0,167$  m, haja maior dissipação de energia do que nos restantes casos estudados para esta configuração.

De modo a relacionar o galgamento do molhe norte do Porto de Leixões com a distância entre o ponto onde ocorre a rebentação da onda e o molhe, foram ana-

Tabela 4 - Valores do caudal médio de galgamento,  $Q$  (l/s/m), para cada uma das configurações e alturas de onda,  $H$ .  
 Table 4 - Values of the mean overtopping discharge,  $Q$  (l/s/m), for each of the configurations and wave heights,  $H$ .

Configuração H (m)	1	2	3	4	5	6	7
0,133	0,08	0,00	0,03	0,09	0,07	0,00	0,00
0,150	0,71	0,00	0,00	0,38	0,39	0,02	0,06
0,167	0,00	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00

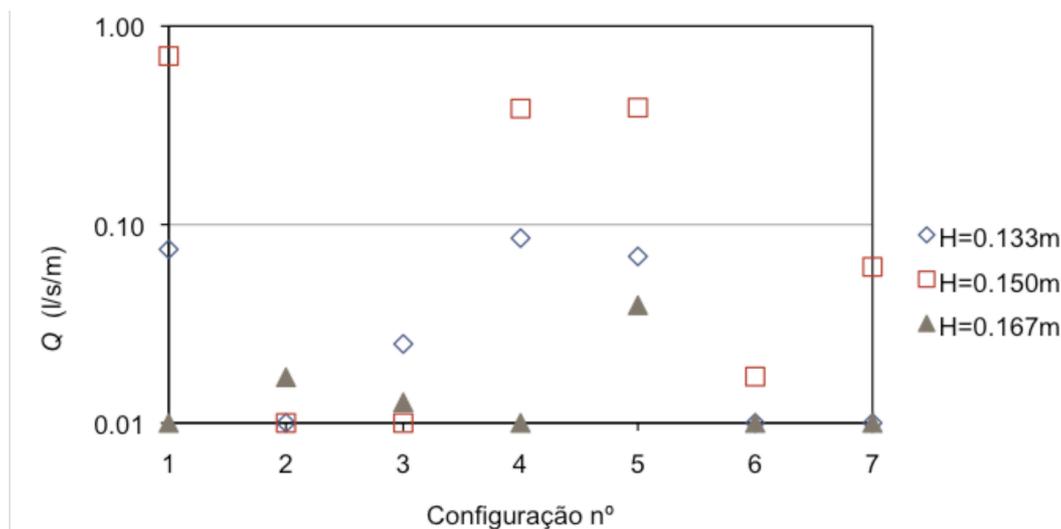


Figura 11 - Caudal médio de galgamento,  $Q$ , para cada uma das sete configurações e para as três alturas de onda,  $H$ , analisadas, para  $T=2,582$  s.

Figure 11 - Mean overtopping discharge,  $Q$ , for each of the seven configurations and for the three wave heights,  $H$ , analyzed, with  $T=2.582$  s.

lisados os resultados instantâneos obtidos pelo modelo numérico IH2VOF para cada uma das sete configurações simuladas. Para tal, foi considerada uma altura de onda incidente de  $H = 0,150$  m, com  $T = 2,582$  s. Na Figura 12 está apresentado o número da configuração no seu lado direito, cujas características se encontram definidas na secção 3.2.

A Figura 12 mostra que, tal como seria de esperar, nas Configurações 2, 3, 6 e 7, ocorreu rebentação numa zona mais distante do molhe norte do Porto de Leixões que nas restantes. Note-se que as Configurações 1, 4 e 5 foram as que tiveram maior galgamento do molhe norte, ou seja, existe uma grande influência da distância entre a rebentação e o molhe norte do Porto de Leixões e o respetivo galgamento. Tal seria de esperar, pois nos casos em que a distância entre a rebentação e o molhe é maior, existe uma maior zona de dissipação de energia da onda e, por isso, a onda que atinge o molhe norte é menos energética, levando a um menor galgamento.

É de notar ainda que, no modelo numérico, a rebentação da onda ocorre a uma mesma distância do molhe norte, mas em locais diferentes do quebra-mar submerso, em

algumas configurações com igual cota de coroamento. Este é o caso das Configurações 2 e 6, onde a onda rebenta aproximadamente à mesma coordenada  $x$  mas que corresponde a um local diferente do quebra-mar submerso, o que sugere uma grande influência da interação entre a onda e as duas estruturas (quebra-mar submerso e molhe norte), especialmente da reflexão, no local de rebentação da onda.

Da análise dos resultados do modelo pode verificar-se que a rebentação que ocorre sobre o quebra-mar submerso é mergulhante em todos os casos de agitação simulados.

### 5. Conclusões

Da análise dos resultados obtidos para estas configurações concluiu-se que o parâmetro que mais influência tem na redução do galgamento é a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a distância entre este e o molhe norte do Porto de Leixões. O aumento destes parâmetros reduz o caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura. O valor mais elevado de galgamento foi obtido para a atual configuração e para

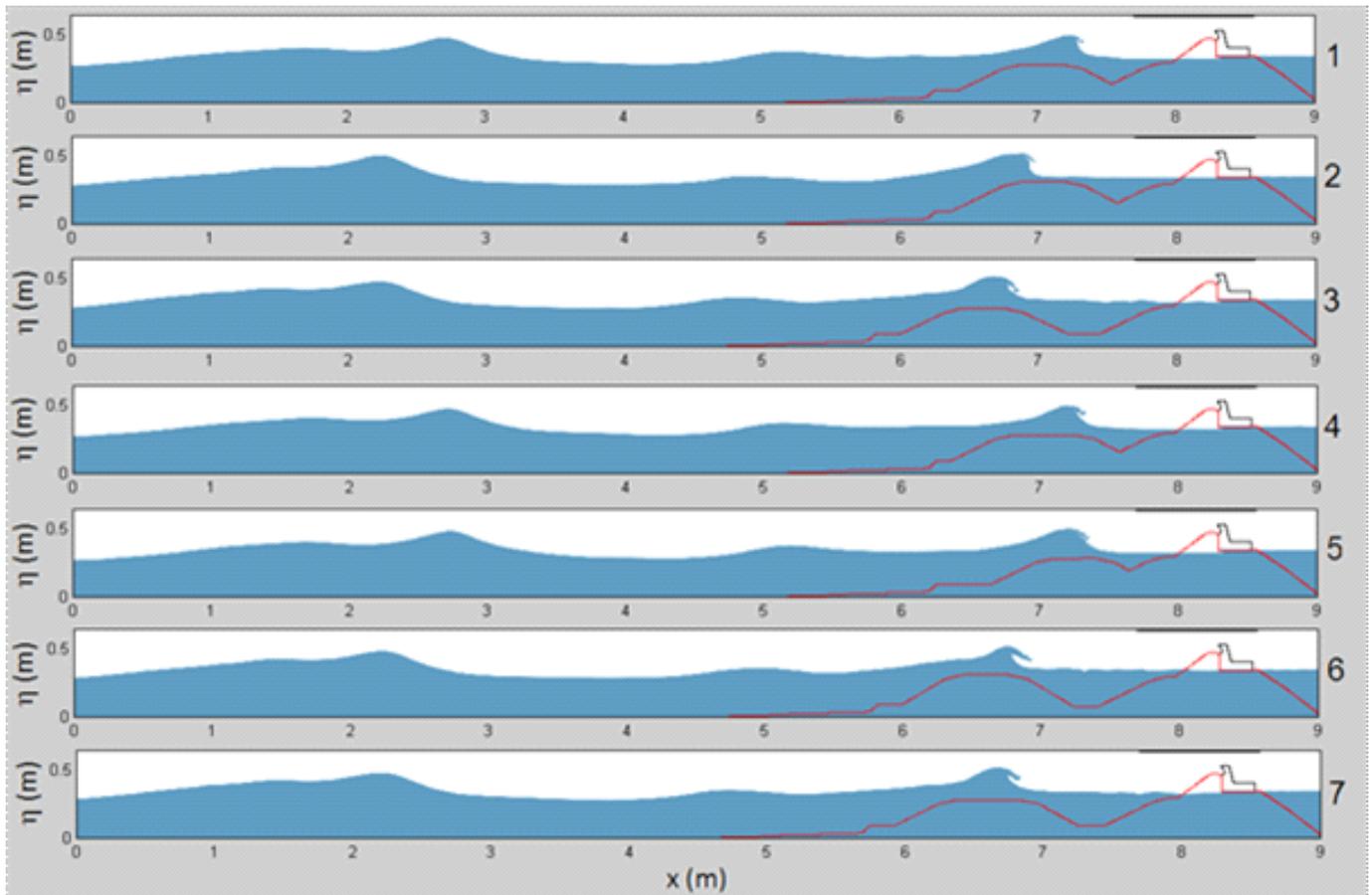


Figura 12 - Resultados do modelo IH2VOF: superfície livre num dado instante para as diferentes geometrias do quebra-mar submerso e com  $H = 0,150$  m e  $T = 2,582$  s.

Figure 12 - Results of IH2VOF model: free surface at a certain instant for the different configurations of the detached breakwater, with  $H = 0.150$  m and  $T = 2.582$  s.

uma altura de onda de 9 m. A configuração onde se aumentou apenas a cota de coroamento e a configuração onde, além do aumento da cota de coroamento, se aumentou a distância entre quebra-mares em 50%, foram as que obtiveram os valores de galgamento mais reduzidos para as alturas de onda de 10 e 9 m, respetivamente. A altura de onda de 9 m foi a que provocou, em geral, maiores galgamentos do molhe norte do Porto de Leixões. Para a altura de onda de 10 m, ocorria rebentação antes de se atingir o quebra-mar submerso, dissipando-se grande parte da energia da onda com a consequente redução do galgamento. Verificou-se que este é menor quando a rebentação ocorre a maior distância do molhe norte.

#### Agradecimentos

Os ensaios bidimensionais do comportamento hidrodinâmico foram efetuados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Os modelos numéricos foram aplicados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito do projeto de investigação DESTAQ (*DESenvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interação entre Quebra-mares destacados e obras portuárias*), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT - PTDC/ECM/100887/2008).

#### Anexo

Informações de Suporte deste artigo estão disponíveis on-line em [http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-568\\_Bairrao\\_Supporting-Information.pdf](http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-568_Bairrao_Supporting-Information.pdf)

#### Referências

- Bairrão, M. (2014) - *Galgamento em estruturas portuárias protegidas por um quebra-mar submerso*. 66p., Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Portugal. *Unpublished*.
- Gadelho, J.F.; Neves, M.G.; Reis, M.T.; Pinto, F. Taveira; Lopes, H.G. (2011) - Estudo da interação entre quebra-mares destacados e obras portuárias com recurso a modelos numéricos. *Proc. 7ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 6 a 7 de outubro de 2011, FEUP, Porto, Portugal. (CD-Rom).
- García, R.G. (2007) - *Análisis de la funcionalidad y estabilidad de obras marítimas mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones de Reynolds*. 266p., Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España. *Unpublished*.
- Gomes, F. Veloso; Pinto, F. Taveira; Dias, E. Brogueira; Lopes, H.G. (2009) - Two-dimensional physical modeling of the northern breakwater of Leixões harbor, Portugal: Case study. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 135(6):288-295. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2009)135:6(288).

- IH2VOF (2012) - *IH2VOF Course (november 20<sup>th</sup>, 2012 – november 21<sup>st</sup>, 2012)*. 121 p., IH Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, España. *Unpublished*.
- Lin, P.Z.; Liu, P.L.F. (1998) - A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359:239-264. DOI: 10.1017/S002211209700846X.
- Lopes, H.; Pinto, F. Taveira; Gomes, F. Veloso; China, R.; Cabral, J.; Gadelho, J.; Neves, M.G.; Reis, M.T. (2013) - Application of image processing tools on physical model tests. *Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 5 a 7 de junho de 2013, LNEC, Lisboa, Portugal. (CD-Rom).
- Lopes, H.G. (2013) - *Experimental analysis of the interaction between waves and a rubble-mound breakwater protected by a detached breakwater, using video imagery techniques. The port of Leixões case*. 191p., Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. *Unpublished*.
- Neves, M.G.; Gadelho, J.F.; Reis, M.T.; Lopes, H.G.; Pinto, F. Taveira; Gomes, F. Veloso; Pereira, R.C. (2013) - Determinação dos galgamentos utilizando o modelo numérico IH2VOF para diferentes geometrias dos quebra-mares do porto de Leixões. *Proc. 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 10 a 11 de outubro de 2013, LNEC, Lisboa, Portugal. (CD-Rom).
- Pinto, F. Taveira (2001). *Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebramares submersos, sob a acção da agitação marítima*. Volume 1, 316p. e Volume 2 (anexos), 323p., Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. *Unpublished*.