

DETERMINAÇÃO DOS GALGAMENTOS UTILIZANDO O MODELO NUMÉRICO IH-2VOF PARA DIFERENTES GEOMETRIAS DOS QUEBRA-MARES DO PORTO DE LEIXÕES

Maria da Graça Neves¹, Jorge Filipe Gadelho¹, Maria Teresa Reis¹, Hugo Guedes Lopes², Francisco Taveira Pinto² e Fernando Veloso Gomes², Rui China Pereira²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

RESUMO

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), estudou-se o comportamento hidrodinâmico de um quebra-mar submerso na vizinhança de uma obra portuária a defender. Este estudo contemplou quer a realização de ensaios em canal na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, quer a aplicação do modelo numérico IH-2VOF pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O caso de estudo é o quebra-mar norte do porto de Leixões.

Nesta comunicação apresenta-se um resumo dos caudais de galgamento sobre o quebra-mar Norte do porto de Leixões obtidos nos ensaios em modelo físico e em modelo numérico realizados para diferentes configurações do quebra-mar submerso proposto para mitigar alguns problemas operacionais aí existentes.

1. INTRODUÇÃO

O quebra-mar Norte do porto de Leixões, que protege o posto A do terminal petrolífero, está sujeito aos fenómenos de galgamento e transmissão de água e sedimentos através da estrutura porosa, o que provoca alguns problemas operacionais. 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 e otimizar o seu dimensionamento, realizaram-se ensaios bidimensionais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e foram aplicados modelos numéricos 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 interacção entre Quebra-mares destacados e obras portuárias*).

Os ensaios do modelo físico decorreram num canal construído no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. Usaram-se técnicas inovadoras para a análise do campo de velocidades para situações tipificadas de ensaio (PIV e Análise de Imagens Vídeo). Desta análise resultaram os dados que serviram, numa fase inicial, para calibrar o modelo numérico, destacando-se as séries temporais da superfície livre medidas em alguns pontos ao longo do canal e alguns parâmetros dos materiais usados no modelo físico. Os ensaios realizados na FEUP permitiram verificar o comportamento de algumas das configurações previstas no que se refere à estabilidade e aos galgamentos.

Na modelação numérica utilizou-se o modelo IH-2VOF (Lara *et al.*, 2006) para modelar a hidrodinâmica na vizinhança dos quebra-mares, em particular o galgamento sobre o quebra-mar existente. Com base nos resultados obtidos nos ensaios e de forma a ampliar a gama de casos estudados, foram efetuadas simulações com o modelo IH-2VOF para 5 geometrias

diferentes do quebra-mar submerso. O nível de maré usado é de +4.0m (ZH), pois é considerado o mais gravoso para a avaliação dos galgamentos e foram simuladas três condições de agitação irregular.

O modelo IH-2VOF resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS) e descreve o escoamento no interior e no exterior de estruturas costeiras, incluindo o escoamento em meios porosos. Este modelo tem sido exaustivamente validado para estruturas marítimas permeáveis e sujeitas a rebentação. As características dos diferentes meios porosos foram calibradas com base nos resultados dos ensaios em modelo físico (Neves *et al.*, 2011).

Nesta comunicação apresentam-se os resultados de galgamento sobre o quebra-mar Norte do porto de Leixões obtidos nos ensaios em modelo físico e em modelo numérico realizados para diferentes configurações do quebra-mar submerso proposto para mitigar alguns problemas operacionais aí existentes.

2. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo escolhido foi o quebra-mar Norte do porto de Leixões, uma estrutura cuja geometria sofreu algumas alterações desde a sua configuração original construída em 1892. A estrutura inicial era formada por um quebra-mar submerso cuja cota de coroamento foi elevada, no final dos anos 60, para o nível de +15.0 m (ZH), devido à expansão do porto. Nos anos 80, a barlar do quebra-mar original, e depois de uma sequência de eventos de destruição da cabeça do quebra-mar, foi construído um quebra-mar submerso com uma extensão de 80.0 m, com o objectivo de melhorar a estabilidade do trecho final da estrutura. É esta a configuração que se mantém atualmente (Figura 1).



Figura 1 – Porto de Leixões e secção transversal do quebra-mar Norte do porto de Leixões.

3. MODELO FÍSICO

Os ensaios em modelo físico do quebra-mar Norte do porto de Leixões decorreram no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil (SHRHA – DEC) da FEUP, Lopes *et al.* (2010), Figura 2.



Figura 2 - Configuração do modelo físico e tanque para medição do volume galgado.

O tanque de ondas tem 28.0 m de comprimento, 12.0 m de largura e 1.2 m de profundidade. Dentro do tanque de ondas foi construído um canal com uma largura de 0.75 m, para a realização dos ensaios bidimensionais (2D). O modelo físico foi construído à escala geométrica de 1:60 e foram colocadas cinco sondas entre o bater e o maciço de coroamento, de modo a controlar a agitação e a determinar a reflexão da estrutura e a transmissão entre quebra-mares.

Para medir o galgamento foi utilizado um reservatório acoplado à superestrutura, que permitiu efetuar o registo dos volumes galgados.

A campanha de ensaios considerou três níveis de maré distintos (0.0 m, +2.0 m e +4.0 m (ZH)), ondulação regular e irregular (espectro JONSWAP) e quatro períodos, T, diferentes, 13 s, 16 s, 20 s e 24 s (em que T representa o período das ondas regulares ou o período de pico do espectro JONSWAP). As alturas de onda regulares (H) variaram de 2.0 m a 14.0 m, enquanto as alturas de onda significativas variaram entre 1.0 m e 7.0 m (todos estes valores se referem às dimensões em protótipo).

Foram ensaiadas cinco configurações:

- 1 – Quebra-mar destacado com cota de coroamento a +0.0m (ZH) – Configuração original;
- 2 – Quebra-mar destacado com cota de coroamento a +2.0m (ZH);
- 3 – Quebra-mar destacado a uma distância do quebra-mar principal 50% superior;
- 4 – Quebra-mar destacado com uma largura de coroamento 50% superior;
- 5 – Estrutura principal sem quebra-mar destacado.

A Figura 3 ilustra as várias configurações testadas. Na configuração 5, pelo facto de existir uma menor atenuação da energia, foi introduzida uma sonda hidrodinâmica no reservatório para efetuar o registo contínuo do galgamento durante cada ensaio.

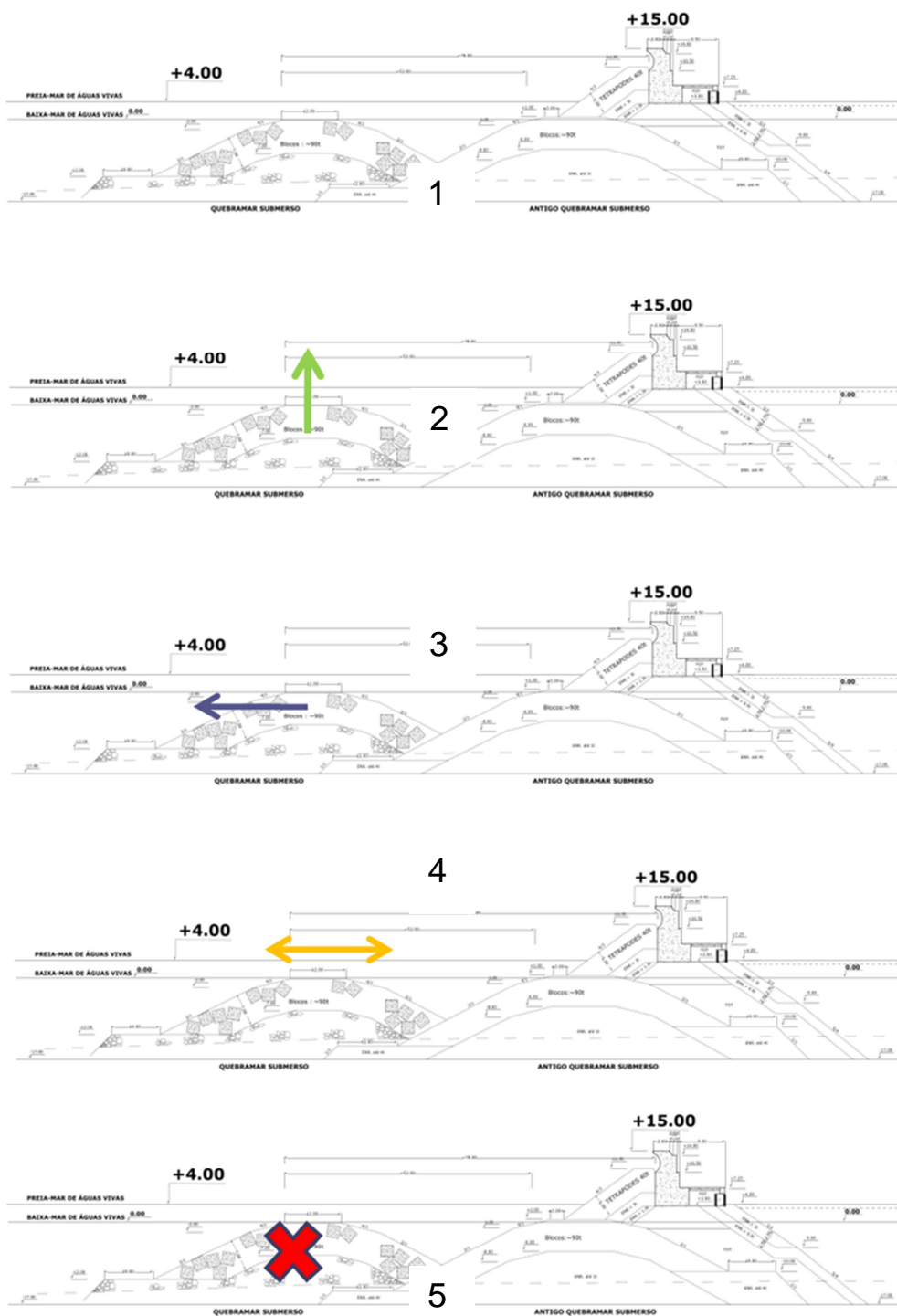


Figura 3 - Configurações testadas em modelo físico.

4. MODELO IH-2VOF

O IH-2VOF é baseado no modelo COBRAS, um modelo bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$, tridimensional (Losada *et al.*, 2008). O modelo incorpora ainda um método de seguimento da superfície livre do tipo "Volume of Fluid" (VOF).

Para o escoamento em meios porosos inclui um modelo de dissipação de energia não linear, que corresponde a uma variação das equações RANS e que se obtém a partir de uma integração num volume de controle no meio poroso, considerando-se assim o meio poroso como um meio contínuo. Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho dos elementos que o compõem e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O IH-2VOF é uma nova versão do modelo desenvolvido na Universidade de Cantábria para ultrapassar algumas das limitações iniciais e especialmente para tornar o programa numa ferramenta útil para aplicações práticas de engenharia. Muitas das modificações têm sido baseadas no extensivo trabalho de validação do modelo para estruturas emersas e submersas e para condições de rebentação em taludes permeáveis (Garcia *et al.*, 2004 e Lara *et al.*, 2006). As modificações realizadas dizem respeito aos seguintes aspectos: geração da agitação marítima e actualização do código; optimização e melhoramento das sub-rotinas principais; melhoramento dos sistemas de entrada e saída do modelo; e desenvolvimento de uma interface gráfica do utilizador e de programas de processamento dos dados de saída.

Tal como referido, neste estudo, o IH-2VOF é usado para calcular o galgamento sobre o quebra-mar Norte. O modelo foi inicialmente calibrado com base nos ensaios da FEUP (Gadelho *et al.*, 2011), isto é, foram definidas as propriedades dos diferentes meios porosos a utilizar no modelo numérico, de forma a permitir reproduzir os ensaios em modelo físico. Verificou-se que o modelo numérico IH-2VOF reproduz com relativa precisão os resultados obtidos em modelo físico.

5. GALGAMENTO DO QUEBRA-MAR NORTE

5.1. Modelo físico

No modelo físico foi analisado o galgamento para as cinco configurações testadas. Nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentados os resultados para cada configuração em que tal ocorreu. H e Hs correspondem à altura de onda e à altura de onda significativa na entrada do canal, respetivamente, e T e Tp ao período e ao período de pico, respetivamente.

Tabela 1- Registos de galgamento no modelo físico para a configuração 1.

Teste	Nível Maré (m (ZH))	Configuração	Agitação (Regular/Irregular)	Valores Protótipo		
				H Hs (m)	T Tp (s)	Q (l/s/m)
88	2	1	Irregular	7	24	0.6
95	4	1	Regular	6	16	3.8
96	4	1	Regular	8	16	3.6
97	4	1	Regular	10	16	5.4
98	4	1	Regular	12	16	4.5
102	4	1	Regular	8	20	4.1
103	4	1	Regular	10	20	5.2
104	4	1	Regular	12	20	4.7
105	4	1	Regular	14	20	5.0
106	4	1	Regular	6	24	4.3
107	4	1	Regular	8	24	4.5
108	4	1	Regular	10	24	4.7
109	4	1	Regular	12	24	4.4
121	4	1	Irregular	7	16	1.4
126	4	1	Irregular	6	20	0.2
127	4	1	Irregular	7	20	0.7
129	4	1	Irregular	4	24	1.0
131	4	1	Irregular	6	24	0.9
132	4	1	Irregular	7	24	0.9

Tabela 2 - Registos de galgamento no modelo físico para as configurações 2, 3 e 4.

Teste	Nível Maré (m (ZH))	Configuração	Agitação (Regular/Irregular)	Valores Protótipo		
				H HS (m)	T Tp (s)	Q (l/s/m)
2514	4	2	Regular	8	20	11.2
2520	4	2	Regular	10	24	13.7
2521	4	2	Regular	12	24	3.5
2633	4	2	Irregular	7	16	2.0
2644	4	2	Irregular	7	24	0.3
2815	4	2	Regular	10	20	13.4
2820	4	2	Regular	10	24	48.8
2820	4	2	Regular	10	24	45.1
2514	4	2	Regular	8	20	11.2
2520	4	2	Regular	10	24	13.7
2520	4	2	Regular	10	24	12.0
2520	4	2	Regular	10	24	12.4

Teste	Nível Maré (m (ZH))	Configuração	Agitação (Regular/Irregular)	Valores Protótipo		
				H HS (m)	T Tp (s)	Q (l/s/m)
4041	4	3	Irregular	4	24	0.1
4043	4	3	Irregular	6	24	0.2
4044	4	3	Irregular	7	24	0.3

Teste	Nível Maré (m (ZH))	Configuração	Agitação (Regular/Irregular)	Valores Protótipo		
				H HS (m)	T Tp (s)	Q (l/s/m)
643	4	4	Irregular	6	24	0.3
644	4	4	Irregular	7	24	1.1
708	4	4	Regular	8	16	6.2
709	4	4	Regular	10	16	4.6
715	4	4	Regular	10	20	18.4

Da análise das Tabelas 1 e 2 foi possível verificar que, ao contrário do que seria de esperar, nem sempre para as mesmas alturas de onda, o galgamento aumenta com o período de onda. Isto verifica-se pelo fato de que só ocorreram galgamentos para condições de agitação limite, o que se explica pelo fato de ocorrer por vezes rebentação antes de atingir o manto de tetrápodos. Das quatro configurações apresentadas nas Tabelas 1 e 2, foi com a configuração 2 que se registaram galgamentos mais significativos, seguindo-se as configurações 4, 1 e 3.

Da análise da Tabela 3 é possível verificar que, em geral, para as mesmas condições de agitação, quanto maior o nível de maré maior o galgamento registado. A tendência apresentada relativamente aos resultados das Tabelas 1 e 2 quanto à variação com o período de onda mantém-se. A configuração sem quebra-mar destacado, como esperado, apresentou os valores mais elevados de galgamento.

Tabela 3 - Registos de galgamento no modelo físico para a configuração 5.

Teste	Nível Maré (m (ZH))	Configuração	Agitação	Valores Protótipo		
			(Regular/Irregular)	H HS (m)	T Tp (s)	Q (l/s/m)
10111	0	5	Regular	6	24	11.6
10404	0	5	Irregular	7	16	0.9
10406	0	5	Irregular	6	20	1.4
10207	2	5	Regular	8	16	0.3
10210	2	5	Regular	8	20	0.3
10211	2	5	Regular	6	24	4.6
10212	2	5	Regular	8	24	3.1
10503	2	5	Irregular	6	16	0.2
10504	2	5	Irregular	7	16	1.6
10506	2	5	Irregular	6	20	7.2
10509	2	5	Irregular	6	24	10.1
10304	4	5	Regular	8	13	3.1
10307	4	5	Regular	8	16	3.1
10310	4	5	Regular	8	20	3.1
10311	4	5	Regular	6	24	44.4
10312	4	5	Regular	8	24	44.4
10603	4	5	Irregular	6	16	0.9
10604	4	5	Irregular	7	16	12.6
10606	4	5	Irregular	6	20	10.1
10607	4	5	Irregular	7	20	10.1
10608	4	5	Irregular	4	24	0.7
10609	4	5	Irregular	6	24	8.4
10610	4	5	Irregular	7	24	8.4

5.2. Modelo numérico

O modelo IH-2VOF foi utilizado à escala do modelo físico (1:60) e para algumas geometrias ensaiadas em modelo físico bem como outras diferentes, a fim de estender os resultados obtidos para outras condições. O domínio computacional tem 8.0 m de comprimento e 0.8 m de altura.

A estrutura foi representada no modelo físico por quatro camadas porosas (CP) diferentes: três compostas por blocos artificiais (CP1, CP2, CP3) e uma por brita (CP4), ver Figura 4. Os blocos artificiais são: cubos de betão em duas secções diferentes (CP1 e CP2), com geometrias ligeiramente diferentes, e tetrápodos (CP3). As principais características das camadas porosas são apresentadas na Tabela 4, onde n é a porosidade, D_{50} é o diâmetro médio equivalente e ρ é o peso volúmico do material.

Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade, n , o tamanho dos elementos que o compõem, D_{50} , e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados, concretamente os coeficientes α e β (coeficientes de atrito linear e não-linear, respetivamente).

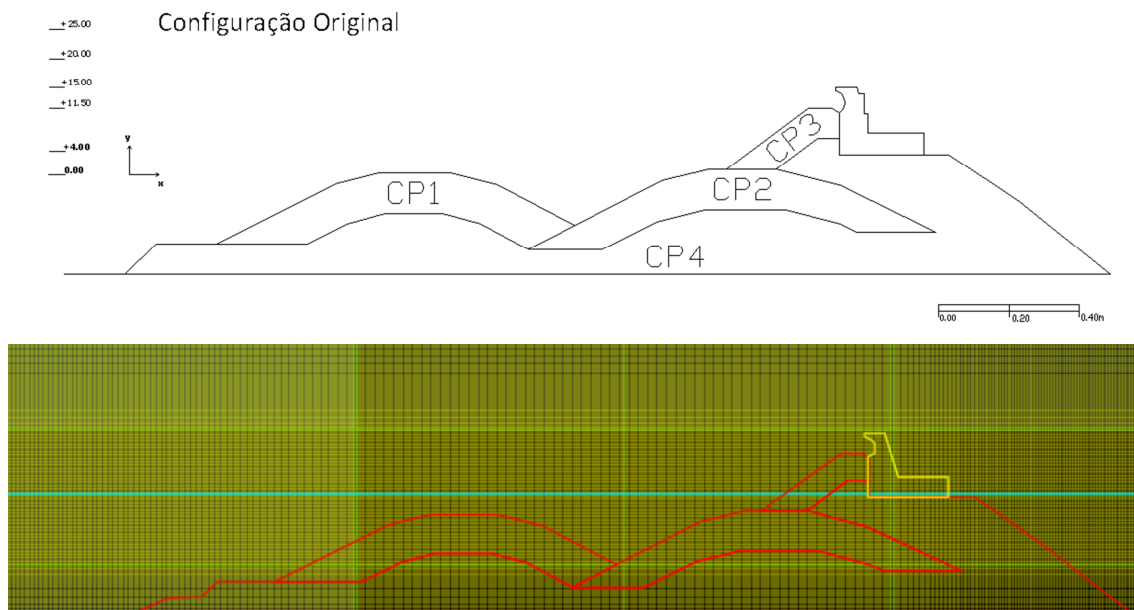


Figura 4 - Representação esquemática da estrutura e aspeto da malha na zona próxima da estrutura com as quatro camadas porosas (a vermelho), a estrutura impermeável (a amarelo) e o nível de água (a azul).

Tabela 4 - Principais características do material das camadas porosas no modelo físico.

	n (%)	D ₅₀ (mm)	ρ (kN/m ³)
CP1 – Cubos	35 – 45	56	24
CP2 – Cubos	35 – 45	56	24
CP3 – Tetrápodos	45 – 55	43	24
CP4 – Brita	20 – 35	19 – 25	18

Para a camada porosa composta pela brita (CP4), a porosidade e o diâmetro no modelo físico são facilmente determinados e mantêm-se praticamente constantes ao longo dos ensaios. Para os parâmetros α e β deste tipo de camada porosa, existem valores recomendados na literatura (Garcia *et al.*, 2004): para α os valores variam entre 200 e 1000 e para β variam entre 0.8 e 1.1. Para blocos artificiais, a porosidade depende do modo de colocação dos blocos e, caso haja movimento dos blocos durante os ensaios, a porosidade poderá variar. Consequentemente, a porosidade também tem de ser calibrada.

O diâmetro é calculado como sendo o diâmetro nominal, baseado na massa dos blocos. No entanto, o mesmo diâmetro nominal com uma geometria diferente dos blocos poderá levar a um escoamento no meio poroso muito diferente. Além disso, não existem indicações na literatura sobre os melhores valores de α e β a utilizar em casos de camadas porosas constituídas por blocos artificiais.

Assim, para definir os valores a utilizar nas simulações numéricas, os parâmetros de cada meio foram calibrados com base nos ensaios com agitação regular da FEUP com a configuração 1, isto é, a configuração original. Os valores resultantes da calibração são os que se apresentam na Tabela 5 (Neves *et al.*, 2011). Como se pode observar, o valor da porosidade é ligeiramente superior ao estimado nos ensaios, o que pode refletir a influência do modo de colocação dos blocos.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros característicos dos meios porosos utilizados nas simulações com o modelo IH-2VOF.

	n (%)	α	β
CP1 – Cubos	55	1000	0.5
CP2 – Cubos	55	200	0.5
CP3 – Tetrápodos	60	200	1.5
CP4 – Brita	25	200	1.1

A malha utilizada é constituída por uma grelha variável nas direções x e y, com comprimento da célula, dx, a variar entre 0.01 m e 0.005 m e largura da célula, dy, a variar entre 0.003 m e 0.006 m. A zona de refinamento máxima corresponde à zona do coroamento da superestrutura, onde se espera obter com o máximo rigor a medição do caudal galgado. O número total de células é de 1214x227. A Figura 4 apresenta esquematicamente a estrutura com as camadas porosas e a malha utilizada nas simulações na zona próxima da estrutura, incluindo a geometria das quatro camadas porosas e a estrutura de coroamento impermeável. A dimensão da malha foi escolhida para que fosse suficientemente fina para assegurar a precisão necessária a esta calibração e suficientemente grosseira para reduzir ao mínimo o tempo de cálculo computacional.

Foram consideradas dezassete secções de medição da superfície livre no modelo numérico: uma colocada junto ao batedor, de modo a controlar a geração da onda, nove localizadas entre o batedor e o quebra-mar submerso, das quais quatro nas mesmas posições que as sondas do modelo físico (três entre quebra-mares e quatro posicionadas no topo da estrutura impermeável, para calcular o galgamento, ver Figura 5).

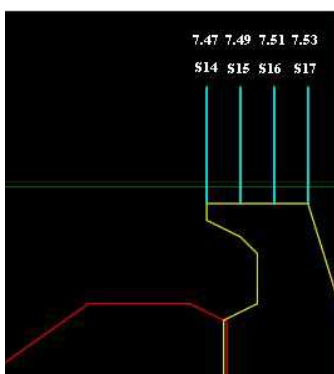


Figura 5 – Esquema da posição das quatro sondas localizadas no coroamento do quebra-mar.

As configurações geométricas testadas com o IH-2VOF incluem casos com e sem quebra-mar submerso, casos com diferente afastamento entre o quebra-mar submerso e o quebra-mar principal e diferentes valores da cota de coroamento do quebra-mar submerso, que se resumem às seguintes cinco configurações (Figura 6):

- 1 – Quebra-mar destacado com cota de coroamento a +0.0m (ZH) – Configuração original;
- 2 – Quebra-mar destacado com cota de coroamento a +2.0m (ZH);
- 3 – Quebra-mar destacado a uma distância do quebra-mar principal 25% inferior;
- 4 – Quebra-mar destacado a uma distância do quebra-mar principal 50% superior;
- 5 – Estrutura principal sem quebra-mar destacado.

Como se pode verificar, as configurações 1, 2, 4 e 5 foram também ensaiadas em modelo físico.

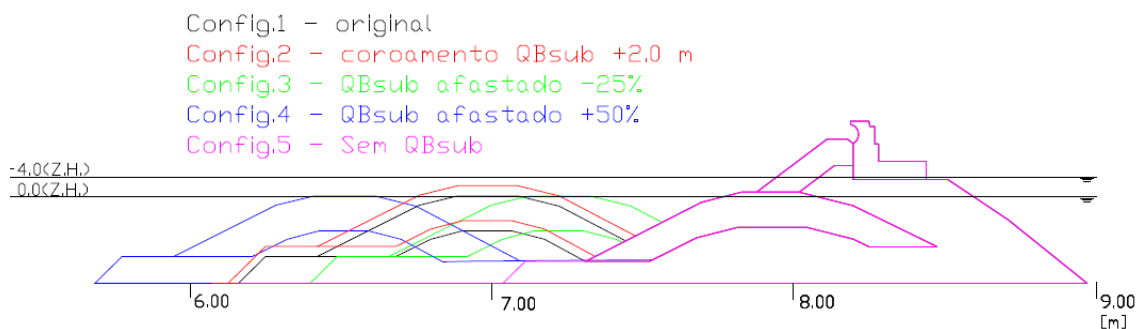


Figura 6 – Configurações testadas em modelo numérico.

Simularam-se três condições de agitação irregular: $H_s=4\text{m}$, $T_p=13\text{s}$; $H_s=7\text{m}$, $T_p=16\text{s}$ e $H_s=7\text{m}$, $T_p=20\text{s}$. Todas as simulações foram realizadas considerando um espectro JONSWAP com fator de esbelteza de 3.3. O nível de maré foi mantido constante e igual a + 4.0 m (ZH).

As simulações foram de 300 s, foram executadas num computador com processador Intel Core2Quad Q6600 a 2.4GHz com 2 GB de memória RAM e o tempo médio de cada corrida foi de cerca de 20 h para 10 s de simulação.

Na É de referir que a condição 3 do modelo físico corresponde às 4 do modelo numérico.

Tabela 6 resumem-se as condições ensaiadas através da modelação física e numérica no âmbito do projeto DESTAQ. É de referir que a condição 3 do modelo físico corresponde às 4 do modelo numérico.

Tabela 6 – Resumo das simulações realizadas em modelo físico e numérico com agitação irregular.

Modelo físico			Modelo numérico		
Configuração	Valores Protótipo		Configuração	Valores Protótipo	
	HS (m)	Tp (s)		HS (m)	Tp (s)
1	7	16	1	7	16
	6	20		4	13
	7	20		7	20
	4	24			
	6	24			
	7	24			
2	7	16	2	7	16
	7	24		4	13
				7	20
3	4	24	4	4	13
	6	24		7	16
	7	24		7	20
4	6	24			
	7	24			
5	6	16	5	4	13
	7	16		7	16
	6	20		7	20
	7	20			
	4	24			
	6	24			
			3	4	13
				7	16
				7	20

Apenas em três casos se repetiram em modelo numérico as condições ensaiadas em modelo físico: configuração 1 com $H_s=7$ m e $T_p=16$ s e 20 s e configuração 2 com $H_s=7$ m e $T_p=16$ s. Estes casos permitiram verificar a calibração realizada para os parâmetros do modelo numérico usando a agitação regular, aferindo do ajustamento dos resultados entre modelos. Na Tabela 7 apresentam-se os resultados de caudal médio galgado, Q , em l/s/m, à escala do protótipo. Tabela 1

Tabela 7 – Caudal médio galgado obtido nos ensaios em modelo físico e nas simulações em modelo numérico.

Configuração	HS (m)	Tp (s)	Modelo físico	Modelo numérico
			Q (l/s/m)	
1	7	16	1.4	0
	7	20	0.7	1.5
2	7	16	2.0	0

A concordância obtida para as alturas de onda significativa nos modelos numérico e físico é razoável (Neves *et al.*, 2011), tendo em conta que os processos de geração da agitação usados em laboratório e no modelo numérico não são exatamente iguais e que a malha usada, devido à extensão do domínio a modelar, não é extremamente fina. No entanto, os resultados obtidos em modelo numérico e físico do valor do caudal médio galgado, Q , diferem significativamente, tal como se pode observar na Tabela 7. De facto, para as condições em que se obteve no modelo físico maior caudal, não se obteve qualquer caudal nas simulações em modelo numérico. Esta discrepância pode dever-se a alterações dos meios porosos nos ensaios, devendo o modelo numérico ser novamente calibrado, no que se refere aos parâmetros dos meios porosos, para o caso de agitação irregular.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 7, um aspecto da rebentação que ocorre entre quebra-mares e sobre o quebra-mar principal num caso realizado com a configuração 1.

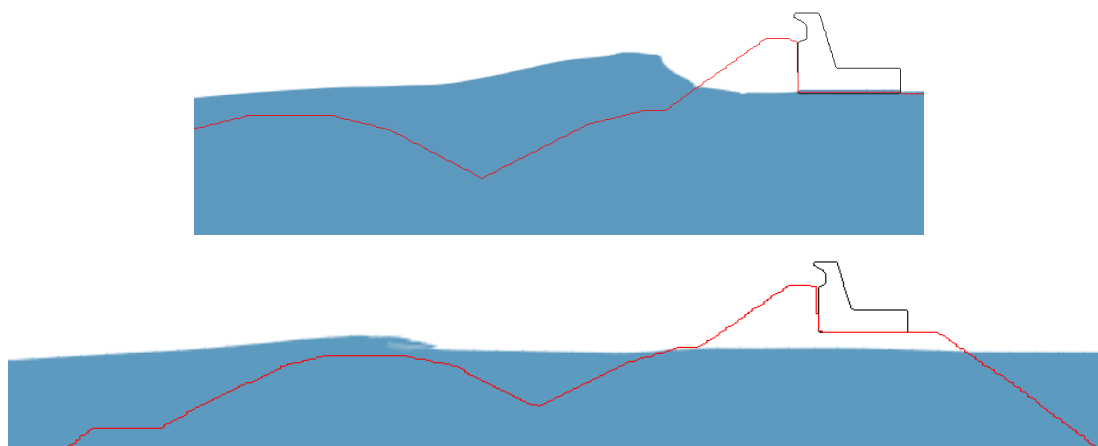


Figura 7 – Aspeto da rebentação no quebra-mar principal e entre quebra-mares numa simulação com a configuração 1.

Embora sem se ter obtido uma validação do modelo numérico, procedeu-se à extensão dos casos estudados para as cinco configurações geométricas e três condições de agitação apresentadas anteriormente. Estes cálculos permitem analisar a influência da geometria e das condições de agitação nos resultados do caudal médio galgado (Tabela 8 e Figura 8).

Na Tabela 8 e na Figura 8 apresentam-se os resultados de caudal médio galgado obtidos para todos os casos de estudo simulados em modelo numérico.

Tabela 8 – Caudal médio galgado obtido nas simulações em modelo numérico.

Configuração	Valores Protótipo		
	HS (m)	Tp (s)	Q (l/s/m)
1	7	16	0.0
	4	13	0.0
	7	20	1.5
2	7	16	0.0
	4	13	0.0
	7	20	0.1
3	7	16	0.0
	4	13	0.0
	7	20	0.6
4	7	16	0.0
	4	13	0.0
	7	20	3.7
5	7	16	1.6
	4	13	0.0
	7	20	15.7

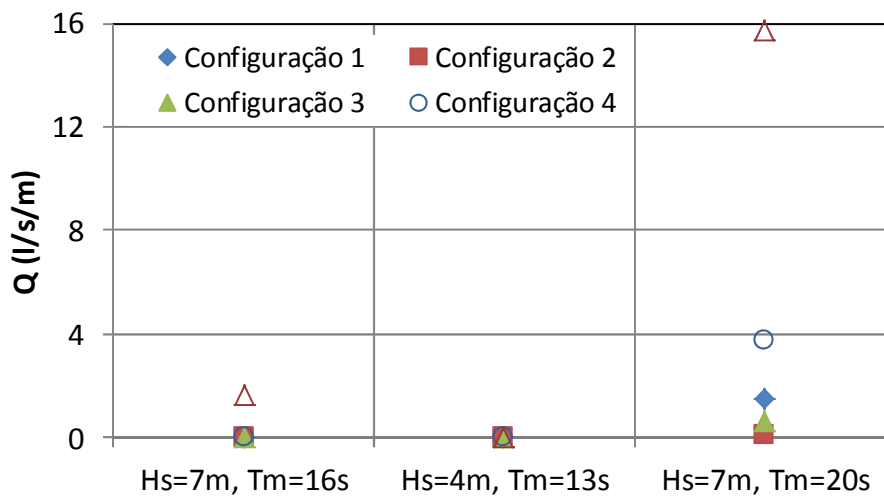


Figura 8 – Caudal médio galgado obtido nas simulações em modelo numérico.

Da análise da Tabela 8 e da Figura 8 foi possível verificar que:

- para a mesma altura de onda ($H_s=7m$), quanto maior o período de onda maior o galgamento registado, tal como ocorria nos resultados dos ensaios em modelo físico.
- apenas se obteve galgamento para condições de agitação limite (maior H_s e T_m simulados), exceto para a configuração 5 (sem quebra-mar submerso).
- das quatro configurações com quebra-mar submerso (1 a 4), foi com a configuração 4 que se registaram galgamentos mais significativos, seguindo-se as configurações 1 e 3. Estes resultados estão de acordo com o que ocorreu em modelo físico no caso de $H_s=7m$, $T_m=24s$.
- a configuração sem quebra-mar destacado, tal como nos ensaios em modelo físico, apresentou os valores mais elevados de galgamento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito do projecto de investigação DESTAQ (*DESEnvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interacção entre Quebra-mares submersos e obras portuárias*), foram realizados ensaios em modelo físico e simulações numéricas utilizando o modelo IH-2VOF para modelar a hidrodinâmica na vizinhança do quebra-mar Norte do porto de Leixões. Este quebra-mar é composto por duas estruturas, uma submersa e uma emersa, localizada imediatamente a sotamar da primeira. Este estudo centrou-se, em particular, na análise do galgamento sobre o quebra-mar emerso. Os ensaios em modelo físico deste quebra-mar decorreram num canal construído no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA – DEC da FEUP. Os ensaios com agitação regular foram utilizados na calibração do modelo numérico IH-2VOF. Com base na calibração efetuada, realizaram-se no LNEC simulações em modelo numérico.

Nesta comunicação apresenta-se um resumo dos caudais de galgamento sobre o quebra-mar Norte do porto de Leixões obtidos nos ensaios em modelo físico e em modelo numérico realizados quer para quatro configurações do quebra-mar submerso proposto para mitigar alguns problemas operacionais aí existentes, quer para uma configuração sem quebra-mar submerso. Para tal, foram simulados casos com diferentes condições de agitação irregular, sempre para preia-mar, que se considerou o caso mais desfavorável no que se refere ao galgamento.

Verificou-se que o quebra-mar submerso, para qualquer uma das configurações geométricas testadas, é efetivo a reduzir o caudal galgado para as condições de agitação ensaiadas. Dos resultados globais obtidos em modelo físico, verificou-se que o parâmetro geométrico do quebra-mar submerso que mais influência tem na redução do galgamento sobre o molhe Norte é o afastamento entre quebra-mares. Já para os casos simulados com o modelo numérico, o parâmetro geométrico do quebra-mar submerso que mais influência tem na redução do galgamento sobre o molhe Norte é a sua cota de coroamento. Esta diferença pode estar relacionada com as características da agitação testadas em cada caso.

Assim, como futuros trabalhos, além da calibração e validação do modelo numérico para casos com agitação irregular, seria interessante analisar os casos de agitação mais gravosos e estudar detalhadamente a influência dos parâmetros do quebra-mar submerso no galgamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gadelho, J.F., Neves, M.G., Reis, M.T., Pinto, F.T. e H.G. Lopes, "Estudo da interacção entre quebra-mares submersos e obras portuárias com recurso a modelos numéricos", Proc. 7^{as} JPECP, Porto, Portugal (2011).
- Garcia, N., Lara, J.L. e I.J. Losada, "2-D Numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters", *Coastal Engineering*, **51**, 991-1020 (2004).
- Lara, J.L., Garcia, N. e I.J. Losada, "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures", *Coastal Engineering*, **53**, 395-417 (2006).
- Lopes, H., Taveira Pinto, F., Veloso Gomes F. e R. Molina, "Video imagery techniques for the wave-structure interaction analysis between detached breakwaters and harbour structures". *Proc. CoastLab10, 3rd International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, Barcelona, Spain (2010).
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R. e J.M. Gonzalez-Ondina, "Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters", *Coastal Engineering*, **55**(1), 47-62 (2008).
- Neves, M.G., Reis, M.T., Gadelho, J.F., Lara, J.L., Pinto, F.T., Lopes, H.G. e J.P. Cabral, "Numerical modelling of waves interacting with the breakwaters of Leixões harbor, Portugal", *Proc. MARINE 2011, 7. IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Lisboa, Portugal (2011)