

ESTUDO DA INTERACÇÃO ENTRE QUEBRA-MARES SUBMERSOS E OBRAS PORTUÁRIAS COM RECURSO A MODELOS NUMÉRICOS

Jorge Filipe Gadelho¹, Maria da Graça Neves¹, Maria Teresa Reis¹, Francisco Taveira Pinto² e Hugo Guedes Lopes²

¹ *Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*

² *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).*

RESUMO

No âmbito do projecto de investigação Destaq (Desenvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interacção entre Quebramares destacados e obras portuárias)¹, pretende-se estudar o comportamento hidrodinâmico de um quebra-mar submerso na vizinhança de uma obra portuária a defender. Este estudo contempla quer a realização de ensaios em canal na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, quer a aplicação de modelos numéricos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

A modelação numérica é efectuada com recurso a dois programas: o AMAZON² que se baseia nas equações NLSW e o IH-2VOF³ que se baseia nas equações RANS.

Nesta comunicação, apresenta-se a metodologia que está a ser usada para analisar a sensibilidade dos resultados obtidos pelo modelo IH-2VOF às características dos meios porosos, que deverão ser calibrados, quer do quebra-mar Norte do porto de Leixões, quer 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, iniciou-se recentemente o projecto de investigação Destaq (Desenvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interacção entre Quebramares destacados e obras portuárias). Este projecto contempla quer a realização de ensaios em canal na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), quer a aplicação de modelos numéricos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Os ensaios do modelo físico reduzido decorrem no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. Usam-se técnicas inovadoras para a análise do campo de velocidades para situações tipificadas de ensaio (PIV, Análise de imagens Vídeo e Sondas Combinadas)¹. Desta análise resultam os dados que servem para calibrar os modelos numéricos, 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.

A modelação numérica desenvolve-se no LNEC e utilizam-se os modelos AMAZON e IH-2VOF para modelar a hidrodinâmica na vizinhança dos quebra-mares, em particular o campo de velocidades entre quebra-mares e o galgamento sobre o quebra-mar existente.

O modelo AMAZON⁴ baseia-se nas equações não lineares de águas pouco profundas e descreve o movimento da água em termos da profundidade total instantânea e da velocidade na profundidade média para ondas regulares e irregulares. A formulação original do modelo AMAZON não tinha em conta, explicitamente, o escoamento em meio poroso. Actualmente o modelo tem em conta o escoamento numa camada porosa, considerada com porosidade constante. O modelo AMAZON será usado para avaliar o galgamento sobre o quebra-mar Norte e será calibrado e validado com base nas medições efectuadas no modelo físico e nos resultados obtidos com o modelo IH-2VOF. Uma vez calibrado, o modelo AMAZON permitirá uma análise rápida do galgamento da estrutura para diferentes geometrias e condições de agitação.

O modelo IH-2VOF³ 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 e será usado no cálculo do campo de velocidades resultante da interacção do quebra-mar submerso e da obra portuária existente e no cálculo do galgamento desta obra. As características dos diferentes meios porosos serão calibradas com base nos resultados dos ensaios em modelo físico.

Nesta comunicação apresenta-se a metodologia de calibração do modelo IH-2VOF e ilustra-se a sua aplicação a dois casos de teste: o primeiro para a situação de preia-mar (PM), com o nível de água de +4.0 m(ZH) e onde o quebra-mar submerso se encontra sob uma significativa coluna de água; o segundo caso corresponde a uma situação de baixa-mar (BM), com o nível de água de 0.0 m(ZH) e onde o quebra-mar submerso se encontra submerso por uma pequena lâmina de água. Os resultados do modelo são comparados com os dados de elevação da superfície livre medidos nos ensaios em diferentes posições a barlar do quebra-mar submerso e entre quebra-mares.

2. CASO DE ESTUDO

2.1. Quebra-mar Norte do porto de Leixões

O quebra-mar Norte do porto de Leixões é uma estrutura cuja geometria tem vindo a sofrer algumas alterações desde a sua configuração original construída em 1892. Inicialmente a estrutura era um quebra-mar submerso cuja cota de coroamento foi elevada, por volta do 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 actualmente (Figura 1).

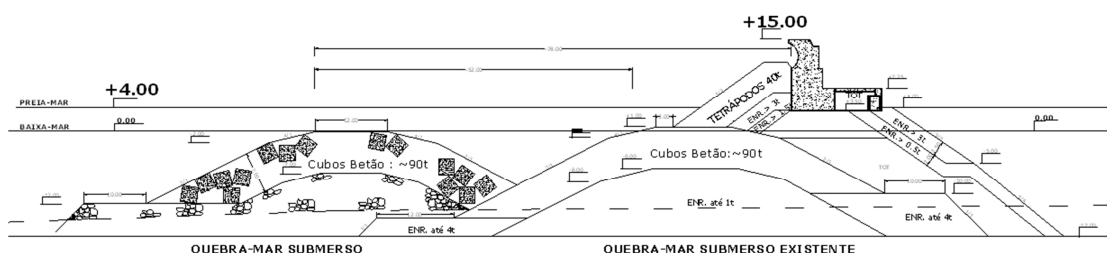


Figura 1 - Secção transversal do quebra-mar Norte do porto de Leixões.

2.2. Modelo físico

Os ensaios em modelo físico do quebra-mar Norte do porto de Leixões estão a decorrer 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 (Figura 2).



Figura 2 - Configuração do modelo físico.

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 a largura de 0.75 m, de modo a efectuar os ensaios 2D do modelo físico. 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 determinar a reflexão da estrutura e a transmissão entre quebra-mares. A campanha de ensaios considera 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) variam de 2.0 m a 14.0 m, enquanto as alturas de onda significativas variam de 1.0 m a 7.0 m (todos estes valores se referem às dimensões em protótipo).

São usadas duas câmaras de vídeo GigE (UI 5220 e UI 5480 µeye – 0.8MPx até 90fps; 5.0MPx até 14fps, respectivamente) para analisar o escoamento durante os ensaios e gravar o movimento das partículas para aplicações PIV (Particle Image Velocimetry) e caracterização do campo de velocidades.

A aquisição de vídeo é feita em duas zonas distintas do canal, na vizinhança do quebra-mar submerso e entre quebra-mares, de modo a que todos os problemas de execução possam ser minimizados. A câmara de alta resolução (UI 5480) é também usada para capturar pequenas extensões com mais detalhe de modo a verificar a influência do nível de resolução.

Nas tradicionais técnicas PIV e PTV (Particle Tracking Velocimetry) é usada uma luz laser para iluminar a área de interesse. Nestes ensaios é abordada uma nova técnica, que consiste no uso de luz branca (focos de halógeno – 2x300W). O uso de luz branca segue a ideia de uma solução económica e de baixas exigências técnicas que possa ser aplicada a ensaios em canal aberto com rebentação. Neste caso em particular, o uso de laser não é recomendado devido à presença de rebentação, e portanto, de um fluxo multifásico.

Este estudo está ainda em curso e os campos de velocidades estão também a ser analisados com recurso a processamento de imagens de vídeo, nomeadamente os tradicionais métodos PIV. Uma sonda multiparamétrica será também usada para analisar as características do escoamento.

3. MODELOS NUMÉRICOS

3.1. AMAZON

O modelo AMAZON foi desenvolvido originalmente em Manchester Metropolitan University² na linguagem de programação C++. A sua formulação baseia-se na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW), que resultam de uma simplificação das equações de Reynolds por integração na profundidade. O modelo permite simular ondas irregulares, quer

na versão unidimensional (canal) aqui utilizada, quer na bidimensional (em planta) e a rebentação é simulada recorrendo ao conceito de macaréu. O AMAZON incorpora um método numérico de absorção de ondas imposto na fronteira de entrada do modelo que permite absorver mais de 98% das ondas reflectidas pela estrutura. Este método de absorção permite colocar a fronteira de entrada perto da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, já que se baseia na resolução das equações NLSW. O AMAZON permite gerar uma malha constituída por elementos que podem ter qualquer forma e dimensões variáveis. Como resultados, o modelo permite obter séries temporais da superfície livre em diversos pontos do domínio, velocidades integradas na vertical e, através destas, as séries temporais de caudais instantâneos, o caudal médio e o caudal de pico em vários pontos da estrutura galgada.

O AMAZON tem sido validado nos mais variados casos de estudo², envolvendo escoamentos permanentes e não permanentes, viscosos e não-viscosos, subcríticos e supercríticos. Tem sido também extensivamente usado e validado para estudar o galgamento de estruturas impermeáveis. Contudo, o AMAZON não tem sido sistematicamente usado e validado no estudo de galgamento de estruturas permeáveis, devido ao facto de, na sua versão original, não ter em conta, explicitamente, escoamentos em meios porosos. Só recentemente se tem vindo a desenvolver o modelo de forma a permitir simular explicitamente o escoamento em meios porosos e a proceder à sua validação sistemática^{5,6,7,8}. Para simular este tipo de escoamento, foram implementadas no modelo as equações de Darcy e de Forchheimer. Apesar das limitações do AMAZON, principalmente relacionadas com o uso da teoria de onda em condições de água pouco profundas, é uma ferramenta que já é usada no dimensionamento de estruturas galgáveis e em estudos de previsão de inundações, dado que permite simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas.

Hu² e Reis *et al.*^{4,5,6} apresentam uma descrição detalhada do modelo e das suas equações.

Neste estudo, o AMAZON será usado para avaliar a elevação da superfície livre e o caudal médio de galgamento sobre o quebra-mar Norte do porto de Leixões.

3.2. IH-2VOF

O IH-2VOF é baseado no modelo COBRAS, um modelo bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS)⁹, ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, k-ε, tridimensional¹⁰. 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 obtêm 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^{11,12}. 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.

Neste estudo, o IH-2VOF é usado para calcular a elevação da superfície livre, o campo de velocidades resultante da interacção dos dois quebra-mares e do galgamento sobre o quebra-mar Norte.

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO IH-2VOF

4.1. Metodologia

Tal como referido anteriormente, para o cálculo do escoamento no meio poroso com o modelo IH-2VOF é necessário definir as propriedades do meio e calibrar alguns parâmetros que dependem do escoamento, concretamente os coeficientes α e β (coeficientes de atrito linear e não-linear, respectivamente). A porosidade, n , e o diâmetro médio equivalente, D_{50} , são parâmetros que podem ser obtidos a partir do modelo físico.

Neste caso, a estrutura foi representada no modelo físico por quatro camadas porosas (CP) diferentes (Figura 3): três compostas por blocos artificiais (CP1, CP2, CP3) e uma por brita (CP4). 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 1.

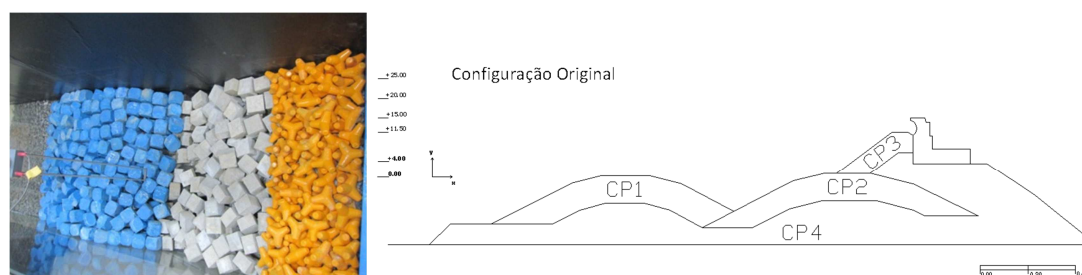


Figura 3 - Estrutura experimental: a) vista em planta do modelo físico, com diferentes blocos artificiais, usados nos ensaios; b) representação esquemática da estrutura, com as diferentes camadas porosas.

Tabela 1 - Principais características do material nas camadas porosas.

	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 do 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 literatura¹¹: 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.

Todas estas restrições, aliadas ao facto de ser bastante difícil avaliar a influência de uma camada porosa isolada das outras, tornou a calibração do modelo IH-2VOF especialmente difícil para este estudo. Adicionalmente, a calibração deve dar uma indicação da importância para o cálculo do galgamento de cada parâmetro em cada camada porosa. Esta informação é bastante importante para decidir acerca dos valores dos parâmetros da camada porosa a

serem usados no AMAZON para o cálculo do galgamento, dado que no AMAZON as diferentes camadas porosas do modelo físico serão simuladas usando uma única camada porosa homogênea. Consequentemente, foi tido especial cuidado na definição de qual é a camada porosa que mais influencia o escoamento global quando ocorre galgamento.

A metodologia que foi usada para analisar a sensibilidade dos resultados do IH-2VOF aos parâmetros de cada camada porosa começou pela definição dos valores base dos parâmetros de cada camada porosa. Após esta definição, para casos seleccionados, as corridas do programa para efectuar a análise de sensibilidade consistiam na alteração, para uma camada porosa de cada vez, do valor de cada parâmetro um a um, mantendo os outros valores inalterados e iguais aos valores base inicialmente definidos. Deste modo, tornou-se mais fácil analisar a influência de cada parâmetro e de cada camada porosa nos resultados.

Os primeiros casos de teste seleccionados foram aqueles onde era esperado que a influência de uma dada camada porosa fosse maior que a influência das outras camadas, facilitando a análise da influência de cada camada porosa separadamente. Numa primeira abordagem foram seleccionados dois casos onde não ocorre galgamento e onde é esperado que a reflexão da agitação na CP3 (para o nível de maré mais alto) e a rebentação na CP2 (para o nível de maré mais baixo) sejam os fenómenos predominantes. Assim espera-se que a CP3 e a CP2, respectivamente, sejam as principais camadas responsáveis pela alteração da agitação e, consequentemente, a variação dos parâmetros a calibrar destas CP a que mais influencia os resultados do IH-2VOF.

De modo a ilustrar a metodologia acima descrita, será aqui apresentado um caso de estudo que corresponde a uma situação de baixa-mar (0.0 m(ZH)) e onde o quebra-mar submerso se encontra sob uma pequena lâmina de água (Caso 2). Serão também apresentados os resultados e principais conclusões do primeiro caso de estudo realizado (Caso 1), que corresponde a uma situação de preia-mar (+4.0 m(ZH)) e onde o quebra-mar submerso se encontra sob uma significativa coluna de água¹³.

4.2. Caso 1

Para o Caso 1, a localização, dimensões e geometria da estrutura experimental foram reproduzidas no domínio computacional, com 8.0 m de comprimento e 0.8 m de altura. Este primeiro caso é caracterizado por uma altura de onda $H=3.5$ cm e um período $T=1.68$ s, com uma profundidade na zona do batador de $h=0.35$ m, que corresponde à preia-mar no protótipo.

Desta análise, apresentada em Neves *et al.* (2011)¹³, verificou-se que, para este caso, a porosidade é o parâmetro que mais influencia os resultados e deve ser analisado com todo o cuidado em casos onde a reflexão desempenha um papel importante. A sua variação altera as características da agitação em todo o domínio. A variação do valor do parâmetro α só é relevante no CP1 e a sua influência faz-se sentir apenas na zona localizada entre o quebra-mar submerso e o quebra-mar Norte. Quanto ao parâmetro β , a sua variação é relevante em todas as camadas porosas mas, tal como α , a sua influência faz-se sentir apenas na zona localizada entre quebra-mares.

Tendo em conta que os processos de geração da agitação usados em laboratório e no modelo numérico não são exactamente iguais (mesmo tendo o especial cuidado em obter o mesmo perfil no início das corridas, com um aumento semelhante do valor de H para os dois modelos) e que a malha usada é grosseira, a concordância das alturas de onda nos modelos numérico e físico para este primeiro caso é razoável. Este facto pode ser confirmado na Figura 4, para $\alpha=200$ para as CP2 e CP3 e $\alpha=1000$ para a CP1; $\beta=0.5$ para as CP1 e CP2 e $\beta=1.5$ para a CP3; e $n=0.55$ para as CP1 e CP2 e $n=0.60$ para a CP3. Neste caso, as diferenças máximas entre o modelo numérico e o modelo físico, em todas as sondas, são inferiores a 8%.

Neste caso a CP1 tem pouca influência nos resultados, dado que está submersa sob uma considerável coluna de água.

As corridas numéricas 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 4 h para 100 s de simulação.

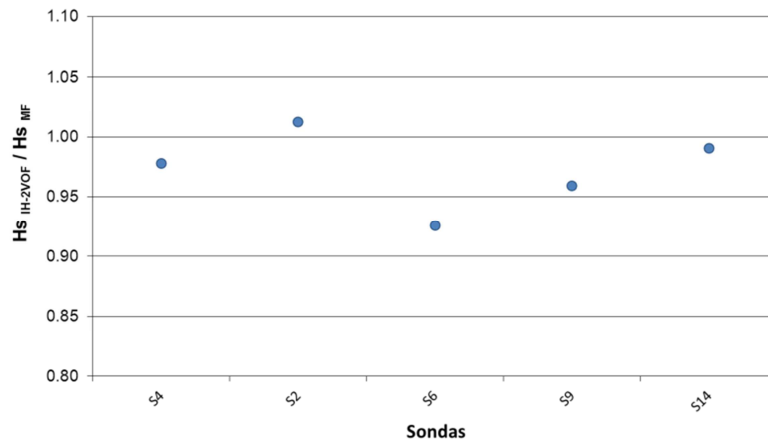


Figura 4 - Valores de H obtidos no Caso 1 em cada sonda para $\alpha=200$ para as CP2 e CP3 e $\alpha=1000$ para a CP1; $\beta=0.5$ para as CP1 e CP2 e $\beta=1.5$ para a CP3; e $n=0.55$ para as CP1 e CP2 e $n=0.60$ para a CP3.

4.3. Caso 2

De modo a analisar a sensibilidade da camada porosa CP1, efectuou-se um segundo caso, com o nível de água mais baixo, que corresponde ao nível de maré 0.0 m(ZH). Tal como para o Caso 1, a localização, dimensões e geometria da estrutura experimental foram reproduzidos no domínio computacional, com 8.0 m de comprimento e 0.8 m de altura, reproduzindo-se as principais dimensões do canal experimental, com o batedor numérico localizado ligeiramente mais próximo da estrutura que o batedor usado no canal dos ensaios físicos.

A malha utilizada tem as mesmas características que as utilizadas no Caso 1: grelha uniforme nas direcções x e y, com comprimento da célula, dx, de 0.01 m e largura da célula, dy, de 0.005 m em todo o domínio. O número total de células foi de 161x851. A Figura 5 mostra a grelha computacional na zona próxima da estrutura, incluindo a geometria das quatro camadas porosas e a estrutura de coroamento impermeável. A dimensão da malha foi escolhida de forma a que fosse suficientemente fina para assegurar a precisão necessária a esta calibração e suficientemente grosseira para reduzir ao mínimo o tempo de cálculo computacional.

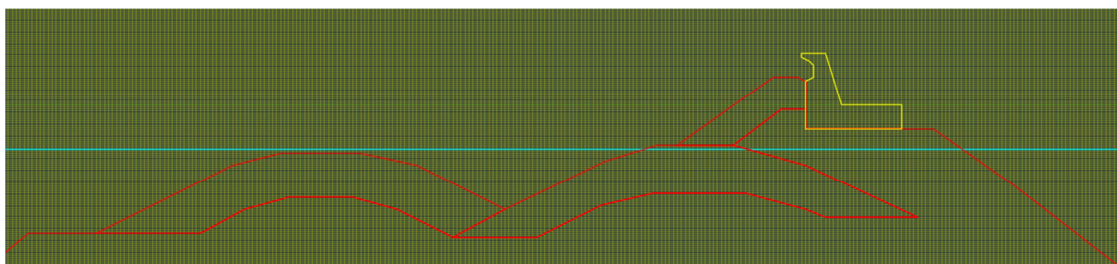


Figura 5 - Aspecto da grelha computacional na zona próxima da estrutura com as quatro camadas porosas (a vermelho), a estrutura de coroamento impermeável (a amarelo) e o nível de água em repouso (a azul).

Foram consideradas oito secções de medição no modelo numérico: cinco localizadas nas mesmas posições que as sondas do modelo físico (quatro entre o batedor e o quebra-mar submerso – S2, S6, S9 e S14 – e uma entre quebra-mares – S4); uma colocada junto ao batedor, de modo a controlar a geração da onda; e duas posicionadas no topo da estrutura impermeável, para calcular o galgamento. Cada corrida de calibração tem a duração de 60 s no IH-2VOF.

No estudo de sensibilidade foram testados diversos valores dos parâmetros α e β de cada CP.

Tal como referido anteriormente, o primeiro passo consistiu na definição dos valores base dos parâmetros α , β e n (Tabela 2). Para os blocos artificiais, o diâmetro médio equivalente foi calculado com base na sua massa e para a brita, o valor médio foi adoptado baseado no intervalo de medições efectuadas no modelo físico. No que toca à porosidade, foi adoptado o valor médio da gama de valores medidos. Os valores de α e β foram definidos com base em valores usados anteriormente em simulações descritas na literatura.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros dos meios porosos adoptados como valores base.

	n (-)	α (-)	β (-)	D_{50} (mm)
CP1	0.40	200	0.8	56
CP2	0.40	200	0.8	56
CP3	0.50	200	1.0	43
CP4	0.25	200	1.1	22

Após esta definição, os valores de cada parâmetro em cada camada porosa foram alterados, um de cada vez, mantendo os outros valores constantes, iguais aos valores apresentados na Tabela 2. A finalidade desta metodologia é, tal como referido, analisar separadamente a influência de cada parâmetro e de cada camada porosa nos resultados. A Tabela 3 mostra os valores usados nas corridas de calibração de cada parâmetro em cada camada porosa. Apesar de alguns valores estarem no limite do recomendado, foi decidido usar uma vasta gama de valores de modo a analisar mais claramente a sua influência nos resultados.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros dos meios porosos usados no estudo de sensibilidade.

	n (-)	α (-)	β (-)
CP1	0.25, 0.35, 0.40, 0.45, 0.55	100, 200, 1000	0.5, 0.8, 1.1
CP2	0.25, 0.35, 0.40, 0.45, 0.55	100, 200, 1000	0.5, 0.8, 1.1
CP3	0.40, 0.50, 0.60	100, 200, 1000	0.5, 1.0, 1.5

As séries temporais das elevações da superfície livre calculadas pelo IH-2VOF para os diferentes valores dos parâmetros das camadas porosas foram comparadas entre si de modo a analisar a influência dos parâmetros nas características da agitação ao longo do domínio e comparadas com as medidas no modelo físico nas sondas S2, S4, S6, S9 e S14, de modo a estabelecer os valores óptimos dos parâmetros de calibração.

Dado que os sinais das sondas S2, S6, S9 e S14, localizadas a barlar do quebra-mar submerso, são aproximadamente sinusoidais, praticamente sem energia nas harmónicas mais altas, os sinais são bem representados pela altura de onda, H , e pelo período, T . A Figura 6 apresenta as séries temporais da superfície livre, η , medidas pelas sondas S2, S6, S9 e S14 no modelo físico entre os instantes $t=40$ s e $t=50$ s e onde se pode observar o carácter sinusoidal destas ondas.

Na sonda S4, localizada entre o quebra-mar submerso e o quebra-mar Norte, a transferência de energia para as harmónicas superiores é bastante clara. Neste caso, a altura significativa, H_s , e o período de pico, T_p , são analisados em conjunto com a energia em cada uma das primeiras cinco harmónicas.

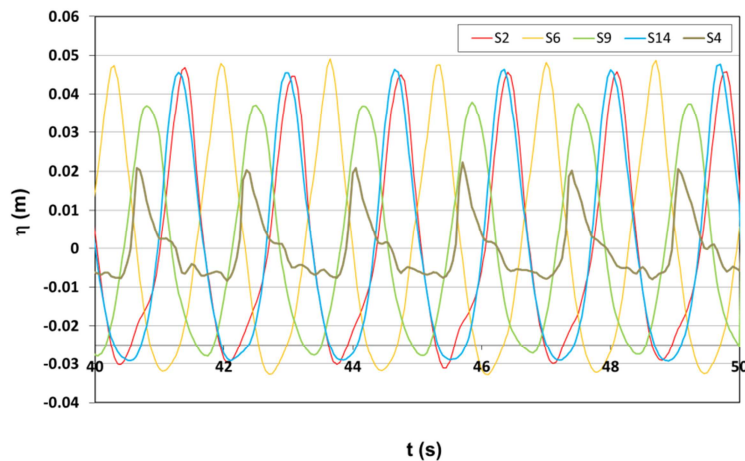


Figura 6 - Séries temporais da superfície livre medidos no modelo físico nas sondas S2, S4, S6, S9 e S14 para $H=6.7$ cm, $T=1.68$ s e $h=0.29$ m.

De modo a ilustrar os resultados, na Figura 7 apresenta-se a variação de $H_{IH-2VOF}/H_{MF}$, assim como a variação da energia $S_{IH-2VOF}/S_{MF}$ obtida em cada harmónica na sonda S4, com a variação do valor do parâmetro α na CP1, β na CP2 e n na CP3. O período foi bem reproduzido no modelo em todas as sondas, quer localizadas antes do quebra-mar submerso, quer o período de pico na sonda S4.

A variação do parâmetro α tem pouca influência no valor de $H_{IH-2VOF}$ nas três camadas porosas e em todas as sondas. Apenas para a sonda localizada entre quebra-mares (S4) é observada alguma influência, com o valor $\alpha=200$ a dar os resultados mais próximos dos obtidos em modelo físico (ver Figura 7 a). Este resultado difere do obtido no Caso 1, onde o melhor resultado foi obtido com $\alpha=1000$, de acordo com Garcia *et al.*¹¹, que sugeria este valor para quebra-mares submersos. No entanto, neste caso, CP1 está submersa apenas por uma pequena lâmina de água, o que pode justificar esta diferença.

A variação do parâmetro β também demonstra pouca influência no valor de $H_{IH-2VOF}$ para as sondas localizadas a barlar da estrutura submersa. Na sonda S4 é visível a influência deste parâmetro para as CP1, CP2 e CP3. Curiosamente, ao contrário do que acontecia no primeiro caso¹³, para a CP1 e CP3 os valores mais baixos de β ($\beta=0.5$) apresentam uma melhor concordância com os valores obtidos no modelo físico, ao passo que para a CP2 os valores mais altos são aqueles que mais se aproximam do modelo físico (ver Figura 7 b).

Quanto à variação de n e como seria de esperar, a CP1 é aquela que é mais sensível à sua variação, influenciando especialmente a altura de onda na sonda S4, mas também a das outras sondas. Isto porque tanto afecta as ondas a barlar, devido à reflexão na CP1, como as ondas entre quebra-mares, devido à transmissão quer através do meio poroso, quer por galgamento sobre este meio. Neste caso, a rebentação ocorre no final da CP1 (Figura 8). Para as CP2 e CP3 (ver Figura 7 c), praticamente só na sonda S4 se faz sentir a influência da variação de n , havendo muito pouca variação nas sondas a barlar, o que leva a concluir que as ondas a barlar são pouco afectadas pelas características destas duas camadas porosas neste caso.

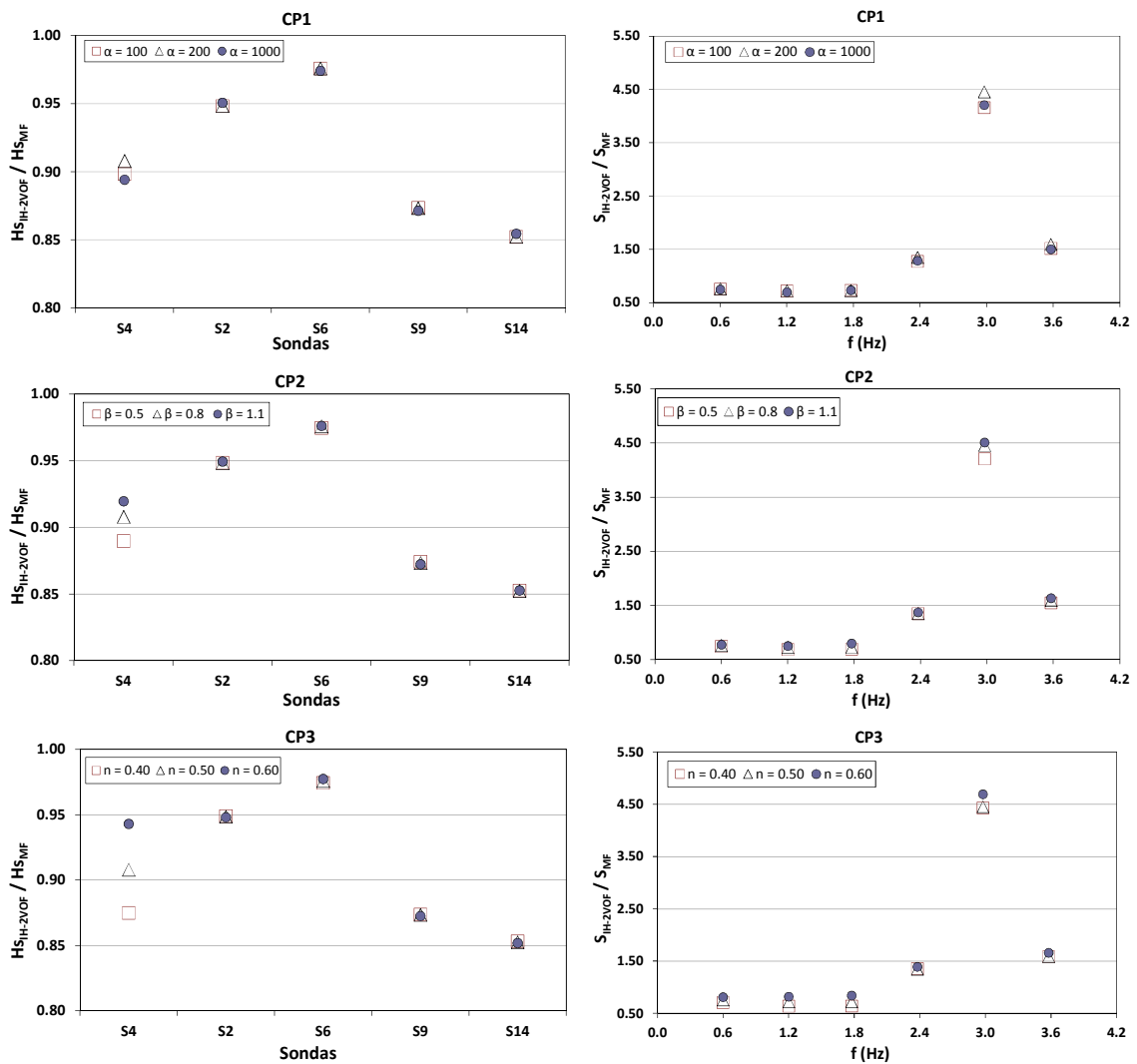


Figura 7 - Valores de $H_{IH-2VOF}/H_{S_{MF}}$ (esquerda) obtidos em cada sonda e de $S_{IH-2VOF}/S_{MF}$ (direita) obtido na sonda S4 para diferentes valores de: a) α para CP1, b) β para CP2 e c) n para CP3.

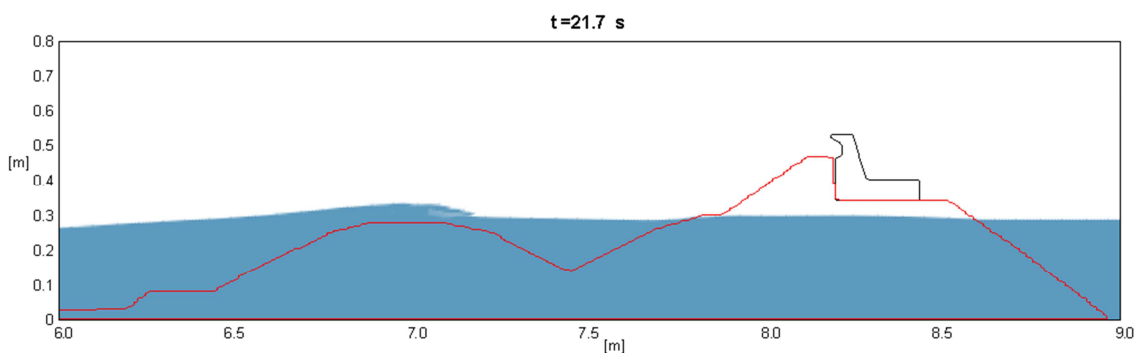


Figura 8 – Aspecto da rebentação entre quebra-mares.

Resumindo, para o Caso 2, a CP1 desempenha o papel mais importante na transformação das ondas a barlar do quebra-mar submerso, sendo a porosidade o parâmetro que mais altera as características da agitação nessa zona. Isto deve-se à grande exposição à agitação a que esta camada porosa está sujeita, por estar submersa apenas por uma pequena lâmina de

água, originando a rebentação da onda sobre ela. Essa dissipação leva a que a energia que atinge o quebra-mar Norte seja muito reduzida e, conseqüentemente, a influência destes meios porosos reduz-se. No que respeita às características da agitação na zona entre quebra-mares, a variação de n em todas as CP é a que mais influencia os resultados e a de α a que menos influencia.

Da análise da sonda S4, no que toca à transferência de energia entre harmónicas (ver Figura 7), em geral, a influência de cada parâmetro é consistente com o obtido para o H.

Na Figura 9 apresentam-se os resultados de $H_{IH-2VOF}/H_{MF}$, para $\alpha=200$ para as CP2 e CP3 e $\alpha=1000$ para a CP1; $\beta=0.5$ para as CP1 e CP2 e $\beta=1.5$ para a CP3; e $n=0.55$ para as CP1 e CP2 e $n=0.60$ para a CP3. Para este caso as diferenças máximas obtidas entre o modelo numérico e o modelo físico são inferiores a 10% excepto na sonda S14. Esta sonda apresenta um erro da ordem dos 15% e a forma da onda, especialmente na cava, difere entre o medido em laboratório e o calculado com o modelo, como se pode ver na Figura 10. Este comportamento não parece ser devido à profundidade ou às características dos porosos. A análise de outros casos com esta profundidade pode ajudar a explicar estas diferenças e a entender se estão relacionadas com o modelo numérico ou com os dados dos ensaios.

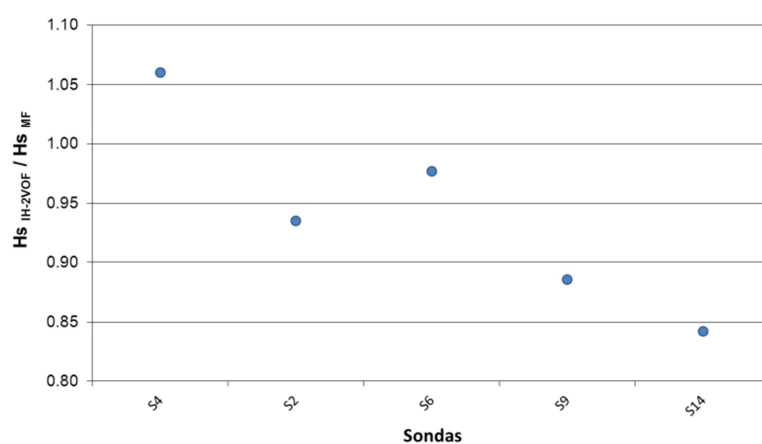


Figura 9 - Valores de H obtidos no caso 2 em cada sonda para $\alpha=200$ para as CP2 e CP3 e $\alpha=1000$ para a CP1; $\beta=0.5$ para as CP1 e CP2 e $\beta=1.5$ para a CP3; e $n=0.55$ para as CP1 e CP2 e $n=0.60$ para a CP3.

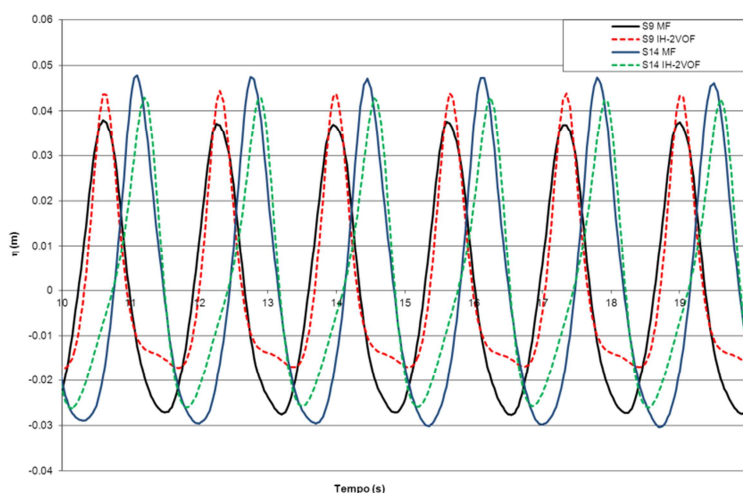


Figura 10 - Séries temporais da superfície livre nas sondas S9 e S14 no modelo físico (MF) e no modelo numérico (IH-2VOF) entre os instantes 10 s e 20 s.

O modelo foi executado 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 3 h para 60 s de simulação.

5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No âmbito do projecto de investigação Destaq (Desenvolvimento de Técnicas Avançadas de medição de velocidades para o estudo da interacção entre Quebramares submersos e obras portuárias), são utilizados dois modelos numéricos (AMAZON e IH-2VOF) para modelar a hidrodinâmica na vizinhança do quebra-mar Norte do porto de Leixões, composto por duas estruturas, uma submersa e uma emersa, localizada imediatamente a sotamar da primeira. Este estudo centra-se, em particular, na análise do campo de velocidades entre quebra-mares e do galgamento sobre o quebra-mar emerso. Os ensaios em modelo físico deste quebra-mar, que estão a decorrer no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA – DEC da FEUP, são utilizados na calibração dos modelos numéricos.

Apresenta-se neste artigo o estudo de sensibilidade aos parâmetros do modelo IH-2VOF que devem ser calibrados e que correspondem às características dos mantos porosos do quebra-mar. Conclui-se que a porosidade destes mantos é o parâmetro que mais influencia os resultados e por isso o valor que deve ser determinado com o maior rigor possível. O modelo numérico IH-2VOF reproduz com relativa precisão os resultados obtidos em modelo físico nos dois casos testados até ao momento.

Após a calibração do modelo IH-2VOF, este será usado para calcular o campo de velocidades entre quebra-mares e o galgamento sobre o quebra-mar existente para diferentes tipos de geometria, ampliando os casos de estudo em modelo físico.

Os resultados obtidos da calibração do modelo IH-2VOF são ainda fundamentais na definição das características da camada porosa que será utilizada no modelo numérico AMAZON para simular as diferentes camadas porosas do quebra-mar.

Estes dois modelos numéricos permitirão simular várias geometrias combinadas com diferentes tipos de agitação, ampliando assim os casos estudados em modelo físico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Lopes, F. Taveira Pinto, F. Veloso Gomes 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).
- [2] K. Hu, *High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling*, PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, UK (2000).
- [3] I.J. Losada, J.L. Lara, R. Guanache e J.M. Gonzalez-Ondina, "Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters", *Coastal Engineering*, **55**(1), 47-62 (2008).
- [4] M.T. Reis e M.G. Neves, "Estudo do galgamento de estruturas marítimas utilizando um modelo numérico baseado na teoria da onda em condições de água pouco profunda", *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, APRH/UNIVALI, 10(4), 397-417 (2010).
- [5] M.T. Reis, M.G. Neves, M.R. Lopes, K. Hu e L.G. Silva, "Rehabilitation of Sines West Breakwater: wave overtopping study", *Maritime Engineering Journal*, Proc. ICE, **164**(MA1), 15-32. ISSN: 1741-7597 (2011).
- [6] M.T. Reis, K. Hu, M.G. Neves e T.S. Hedges, "Numerical modelling of breakwater overtopping using a NLSW equation model with a porous layer", Proc. *31st ICCE*, Hamburg, Germany, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 3097-3109 (2008).
- [7] M.T. Reis, M.G. Neves e K. Hu, "Wave overtopping of a porous structure: numerical and physical modelling", *Journal of Coastal Research*, **SI 56**, 539-543 (2009).

- [8] M.T. Reis, M.G. Neves, K. Hu, M.R. Lopes e L.G. Silva, "Final rehabilitation of Sines west breakwater: physical and numerical modelling of overtopping", *Proc. 9th Coasts, Marine Structures and Breakwaters: Adapting to Change*, Edinburgh, W. Allsop (Ed.), Thomas Telford, London, Vol. 2, pp. 636-647; discussão: pp. 671-672. ISBN: 978-0-7277-4131-8.
- [9] P. Lin e P.L.-F. Liu, "A numerical study of breaking waves in the surf zone", *Journal of Fluid Mechanics*, **359**, 239-264 (1998).
- [10] T.-J. Hsu, T. Sakakiyama e P.L.-F. Liu, "A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater", *Coastal Engineering*, **46**, 25-50 (2002).
- [11] N. Garcia, J.L. Lara e I.J. Losada, "2-D Numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters", *Coastal Engineering*, **51**, 991-1020 (2004)
- [12] J.L. Lara, N. Garcia e I.J. Losada, "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures", *Coastal Engineering*, **53**, 395-417 (2006).
- [13] M.G. Neves, M.T. Reis, J.F. Gadelho, J.L. Lara, F.T. Pinto, H.G. Lopes e J.P. Cabral, "Numerical modelling of waves interacting with the breakwaters of Leixões harbor, Portugal", *Proc. MARINE 2011, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Barcelona, Spain (2011)