

MODELAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA DAS VELOCIDADES NUM QUEBRA-MAR SUBMERSO. O CASO DO PORTO DE LEIXÕES

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

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Do Brasil 101, 1700 – 066 Lisboa, Portugal
email: jgadelho@lneec.pt; gneves@lneec.pt; treis@lneec.pt <http://www.lneec.pt/organizacao/dha>

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FE/UP), R. Dr. Roberto Frias, 4200 – 465 Porto, Portugal
email: hglopes@fe.up.pt; fpinto@fe.up.pt; vgomes@fe.up.pt <http://www.fe.up.pt/>

Sumário

Neste artigo apresentam-se os campos de velocidades obtidos em modelo físico e numérico, na vizinhança de um quebra-mar submerso junto ao quebra-mar Norte do Porto de Leixões. Os campos de velocidades do modelo físico, obtidos com recurso a técnicas PIV, são comparados com os campos de velocidades do modelo numérico, obtidos através das simulações com o modelo numérico IH-2VOF. Os resultados obtidos até ao momento permitem concluir que, em geral, se obtém uma boa concordância em relação às velocidades horizontais. Quanto às velocidades verticais, embora a ordem de grandeza dos valores obtidos seja semelhante, os valores obtidos no modelo físico apresentam maiores irregularidades do que no modelo numérico.

Palavras-chave: Velocidades; IH-2VOF; PIV; Quebra-mar Submerso; Porto de Leixões.

1 INTRODUÇÃO

Os quebra-mares são estruturas cujo objetivo é oferecer abrigo a zonas costeiras e portuárias e geralmente são construções bastante robustas. Os quebra-mares submersos distinguem-se dos restantes, por terem uma cota de coroamento abaixo do nível médio das águas do mar e, por isso, são estruturas galgáveis. As principais vantagens do uso deste tipo de estruturas são de ordem económica e estética.

Até agora o dimensionamento de quebra-mares tem-se baseado quer num conjunto de formulações empíricas ou semiempíricas, que são bastante limitadas a nível de tipologia e de clima de agitação, e que muitas vezes poderão não reproduzir com rigor a realidade, quer em ensaios em modelo físico, que são bastante fiáveis, mas são morosos e dispendiosos. O desenvolvimento de programas de cálculo numérico tem vindo a torná-los numa ferramenta atrativa para complementar os estudos em modelo físico, sobretudo na avaliação dos galgamentos e da hidrodinâmica junto dessas estruturas. No entanto, apesar dos grandes avanços que os modelos numéricos têm vindo a sofrer, a avaliação das velocidades dentro e fora das camadas porosas apresenta ainda algumas lacunas.

No caso do quebra-mar Norte do Porto de Leixões [1] (Figura 1), o quebra-mar submerso foi construído para proteger o quebra-mar principal não galgável, não sendo conhecido o campo de velocidades resultante entre os quebra-mares. A análise deste campo de velocidades permitirá compreender a funcionalidade da estrutura, assim como futuras implicações na morfodinâmica da zona em estudo.

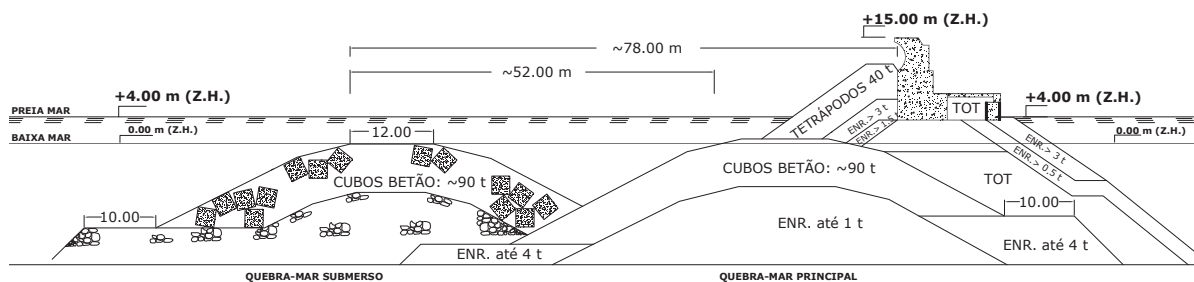


Figura 1 - Secção transversal tipo do quebra-mar Norte do Porto de Leixões (adaptado de [1]).

Para aprofundar o estudo da influência do quebra-mar submerso na hidrodinâmica da zona iniciou-se em 2010 o projeto de investigação DESTAQ (**DE**Senvolvimento de **Técnicas** Avançadas de Medição de Velocidades para o Estudo da Interação entre **Quebramares** Destacados e Obras Portuárias), cujo objetivo inclui o estudo aprofundado dos campos de velocidades entre os quebra-mares e o galgamento do quebra-mar Norte do Porto de Leixões, prevendo também estudos em modelo físico e numérico.

Os ensaios em modelo físico dos quebra-mares 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 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Paralelamente estão a decorrer simulações em modelo numérico no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com recurso a dois modelos: o IH-2VOF [2], que se baseia nas equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), e o AMAZON [3], que se baseia nas equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW) e que, devido às equações de base, está mais vocacionado para o estudo do galgamento.

No presente trabalho será utilizado o modelo IH-2VOF juntamente com os resultados do modelo físico, para descrever os campos de velocidades em todo o domínio de cálculo e verificar as vantagens e limitações de cada uma destas ferramentas de apoio ao projeto.

2 MODELO FÍSICO

O tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA – DEC da FEUP, que serve de base aos ensaios físicos, tem uma configuração retangular em planta com 28.0 m de comprimento, 12.0 m de largura e 1.2 m de altura. O sistema de geração de agitação da *HR Wallingford* é composto por 16 módulos com 0.75 m de largura cada, ocupando a totalidade da largura do tanque, e permite gerar ondas regulares e irregulares. De modo a efetuar os ensaios 2D, foi construído dentro do tanque um canal com o mesmo comprimento e com uma largura de 0.75 m (Figura 2a). O modelo foi construído à escala geométrica de 1:60, numa secção envidraçada do tanque (Figura 2b), e foram colocadas cinco sondas hidrodinâmicas e duas câmaras de vídeo (Figuras 2b e 2c). A combinação destes dois tipos de equipamento permite avaliar a hidrodinâmica ao longo do canal, com maior detalhe sobre o quebra-mar submerso e entre quebra-mares.



Figura 2 - Configuração do modelo físico: a) canal construído dentro do tanque b) pormenor do modelo reduzido c) câmaras de captura de imagem.

O equipamento de vídeo usado na captura de imagens, para a análise PIV (*Particle Image Velocimetry*) [4], é composto por duas câmaras de vídeo GigE (UI 5220 e UI 5480 μ eye – 0.8 MPx até 90 fps e 5.0 MPx até 14 fps, respetivamente). A iluminação das zonas de interesse foi feita com recurso a luz branca (dois focos de halogéneo de 2x300 W), em alternativa à tradicional luz laser. Esta metodologia de aquisição segue a ideia de uma solução económica e de baixas exigências técnicas que possa ser aplicada a ensaios em canal aberto com rebentação.

O plano de ensaios foi definido tendo em consideração a agitação local e o objetivo último de analisar a interação entre o quebra-mar submerso e o quebra-mar de taludes principal. Nesse sentido, foram definidas quatro fases de ensaio, cada uma contemplando agitação regular e irregular, caracterizadas por diferentes configurações geométricas do quebra-mar submerso, como definido na Tabela 1. Os valores atuais da cota de coroamento e da largura de coroamento são +0.0 m (Z.H.) e 12.0 m, respetivamente (valores de protótipo).

Tabela 1 - Fases de ensaio do modelo físico.

Fase	Configuração geométrica do quebra-mar submerso
1	Quebra-mar com cota de coroamento a +0.0 m (Z.H.)
2	Quebra-mar com cota de coroamento a +2.0 m (Z.H.)
3	Quebra-mar a uma distância do quebra-mar principal 50% superior à atual
4	Quebra-mar com uma largura de coroamento 50% superior à atual

Em cada fase, foram considerados três níveis de maré: +0.0 m (Z.H.), +2.0 m (Z.H.) e +4.0 m (Z.H.), variando as características da agitação incidente. Os ensaios com agitação regular foram efetuados para alturas de onda (H) entre 2.0 m e 14.0 m e períodos de onda (T) de 13 s a 24 s. Os ensaios com agitação irregular (espectro JONSWAP com $\gamma=3.3$) foram efetuados para alturas de onda significativas entre 1.0 m e 7.0 m e períodos de pico entre 13 s e 24 s, valores no protótipo.

A metodologia de análise do modelo físico com recurso a ferramentas de processamento de imagem é a descrita em [5]. Importa referir as duas principais funcionalidades deste tipo de análise que contribuem para o presente estudo: a avaliação da elevação da superfície livre com recurso a sondas virtuais e a avaliação dos campos de velocidades de uma dada zona de interesse.

A avaliação da elevação da superfície livre é feita com recurso ao *software* Zeus [5], [6], através da análise *Time Stack* combinada com a análise *Edge Time Stack*. Conclui-se que esta técnica produz bons resultados na análise das séries temporais de elevação da superfície livre, com desvios inferiores a 5% na avaliação do período da onda, e descreve igualmente bem as amplitudes máximas das ondas.

A análise dos campos de velocidades está a ser efetuada com o programa livre PIVLab, *Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool* for MATLAB [7], e tem produzido bons resultados. No entanto, tem-se verificado que, quer pelas limitações do sistema de aquisição de vídeo, quer pelas limitações do programa de análise, nas zonas de transição entre a parte líquida e a parte sólida, e entre a parte líquida e a parte gasosa, existem alguns erros na análise das velocidades. Para mitigar este problema, nos ensaios com maior relevância, tem sido efetuada uma análise *frame a frame*, e mesmo assim os resultados obtidos poderão não ser satisfatórios.

Importa referir que na análise PIV a dimensão, densidade e comportamento das partículas traçadoras no fluido condicionam a qualidade dos resultados. Também a resolução, a frequência de aquisição e as condições de iluminação têm um papel determinante nos resultados. Para além dos parâmetros referidos, existe também a influência do comportamento não puramente bidimensional do escoamento, isto é, o movimento das partículas traçadoras ao longo do plano perpendicular ao plano de câmara pode introduzir algumas distorções nos resultados.

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 O modelo IH-2VOF

O modelo IH-2VOF foi desenvolvido no Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria e é baseado no modelo COBRAS-UC [2]. É um modelo bidimensional que se baseia nas equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) e descreve o escoamento de uma massa líquida dentro e fora de uma estrutura porosa. Tal como o nome indica, o modelo incorpora um método de seguimento da superfície livre do tipo *Volume of Fluid* (VOF).

O IH-2VOF inclui um modelo não linear de turbulência [8], do tipo k- ϵ , e, de modo a tornar o modelo numa ferramenta útil para aplicações práticas de engenharia, tem implementadas ferramentas ao nível da geração da agitação marítima, otimização das sub-rotinas principais e desenvolvimento de uma interface gráfica do utilizador que o tornam num programa amigável para o utilizador.

Ao longo da última década, o IH-2VOF tem sido amplamente utilizado e validado no que diz respeito ao comportamento hidrodinâmico de estruturas costeiras das mais diversas tipologias, apresentando bons resultados em estruturas porosas, quebra-mares submersos, quebra-mares impermeáveis e alguns tipos de estrutura não convencionais [9], [10], [11], [12]. Deste modo, o modelo mostra-se bastante robusto e pode funcionar tanto à escala do modelo físico, simulando um canal numérico virtual, ou à escala do protótipo, podendo assim ser aplicado a estruturas não convencionais, para as quais não existem ferramentas empíricas diretamente aplicáveis.

Para além da possibilidade da obtenção de informação sobre pressões e velocidades, entre outras, ao longo de todo o domínio de cálculo, o modelo permite ainda considerar sondas numéricas, que registam séries temporais de elevação da superfície livre, velocidades e pressões numa determinada secção. Os parâmetros medidos podem ser extraídos em qualquer secção do domínio de cálculo, mesmo no interior das camadas porosas. Podem ainda ser calculados outros parâmetros, tais como volumes médios de galgamento, ou mesmo as forças na estrutura, que podem ser utilizados na análise de estabilidade [13].

3.2 Calibração do modelo

Dado que o quebra-mar Norte do Porto de Leixões é uma estrutura porosa, para a simulação do escoamento no interior das camadas porosas é necessário calibrar alguns parâmetros de cada camada, que dependem do escoamento (α , coeficiente de atrito linear e β , coeficiente de atrito não linear), e outros que dependem das características físicas dos materiais (porosidade, n , diâmetro médio equivalente, D_{50} , e peso específico, γ , do material de cada camada).

A metodologia de calibração deste modelo é a descrita em [14] e [15] e permitiu concluir que o modelo numérico IH-2VOF descreve com relativa precisão as séries temporais de elevação da superfície livre obtidas em modelo físico. A estrutura utilizada nas simulações numéricas, Figura 3, apresenta uma geometria semelhante à utilizada nos ensaios físicos, isto é, com uma escala geométrica de 1:60 relativamente ao protótipo, com quatro camadas porosas (CP) de características diferentes: três compostas por blocos artificiais (CP1, CP2 e 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).

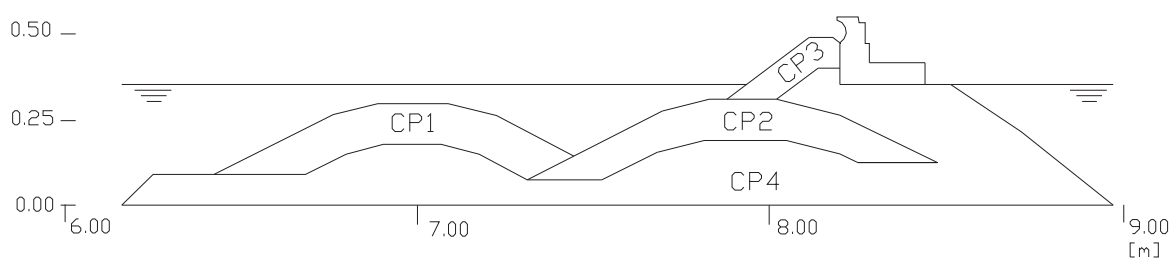


Figura 3 - Esquema da estrutura utilizada nos ensaios numéricos, com as diferentes camadas porosas.

As principais características físicas dos materiais de cada camada porosa no modelo físico (MF) e o valor dos parâmetros resultantes da calibração do modelo numérico (MN) com base nos dados dos ensaios em modelo físico são apresentados na Tabela 2. Estes são os valores utilizados no caso apresentado neste artigo.

Tabela 2 - Principais características dos materiais das camadas porosas no Modelo Físico e valor dos parâmetros calibrados do Modelo Numérico.

Camada Porosa	Características no MF			Valores dos parâmetros do MN		
	n (-)	D ₅₀ (mm)	γ (kN/m ³)	α (-)	β (-)	n (-)
CP1 – Cubos	0.35 – 0.45	56	24	1000	0.5	0.55
CP2 – Cubos	0.35 – 0.45	56	24	200	0.5	0.55
CP3 – Tetrápodos	0.45 – 0.55	43	24	200	1.5	0.60
CP4 – Brita	0.20 – 0.35	19 – 25	18	200	1.1	0.25

3.3 Campos de velocidades

A avaliação dos valores das velocidades horizontais e verticais no modelo IH-2VOF é feita para todas as células da malha e ao longo de todo o tempo de cálculo. Para secções particulares, pode-se colocar uma sonda numérica vertical que regista as séries temporais das velocidades verticais e horizontais nos pontos da malha onde está localizada a sonda e permite relacionar estes valores com as séries temporais de elevação da superfície livre. Assim, é possível comparar as velocidades obtidas com a análise PIV do modelo físico com as velocidades obtidas com o modelo numérico em pontos da zona de interesse (ZI), isto é, na janela de captura e processamento da imagem no modelo físico.

A análise dos campos de velocidades que aqui se apresenta é feita para duas ZI distintas (Figura 4) e para a mesma condição de agitação incidente: altura de onda, H = 2.0 m, período, T = 13 s, nível de maré de +4.0 m (Z.H.) (valores de protótipo) e para a configuração geométrica apresentada na Figura 1 (Fase 1 dos ensaios em modelo físico). Estas condições de agitação são as que provocam menor turbulência nas ZI e facilitam a obtenção de resultados fidedignos da análise PIV que possam ser comparáveis com os resultados obtidos no modelo numérico.

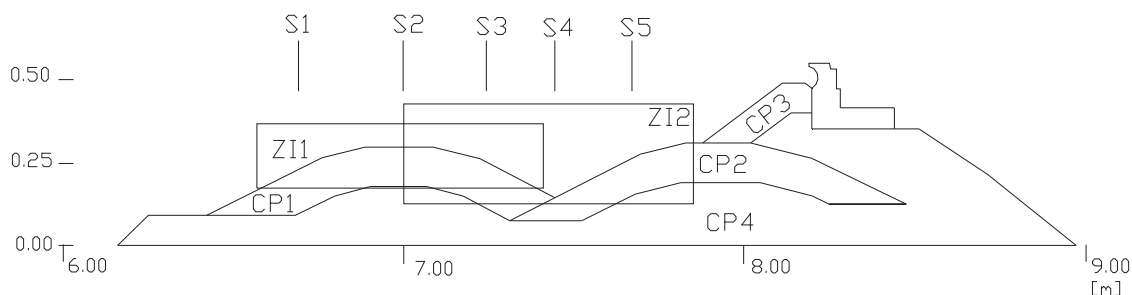


Figura 4 - Esquema das zonas de interesse (ZI) e do posicionamento das sondas virtuais (S) utilizadas na análise do modelo físico.

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A comparação das velocidades obtidas em MF e em MN revelou-se particularmente difícil por duas razões: a indefinição geométrica das ZI no MF e o acerto da fase da onda entre os dois modelos.

Para facilitar a análise recorreu-se a uma facilidade da análise do processamento de imagem: na fase de processamento dos vídeos do MF, existe a possibilidade de colocação de sondas virtuais que registam as séries temporais de elevação da superfície livre. Assim, optou-se por colocar cinco sondas: três na ZI1 (S1, S2 e S3) e duas (S4 e S5) na ZI2, tendo o cuidado de colocar sondas numéricas nas mesmas posições, de modo a acertar a fase e verificar as características da agitação. Assim, o acerto da geometria e da fase da onda é feito com base na comparação visual da geometria dos dois modelos e na comparação das séries temporais de elevação das superfícies livres nas sondas virtuais do MF e nas sondas do MN. A comparação visual é feita sobrepondo os campos de velocidades dos dois modelos e verificando se a fronteira entre a parte sólida e a parte líquida do

modelo físico coincide com o contorno da estrutura, resultante da geometria do modelo numérico. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 5 o campo de velocidades instantâneas do modelo numérico (vetores a vermelho) e o proveniente do modelo físico (vetores a azul), onde, a preto, está representado o contorno superior da CP1 na ZI1. Como se pode observar, no interior do meio poroso não é possível obter valores de velocidades no MF.

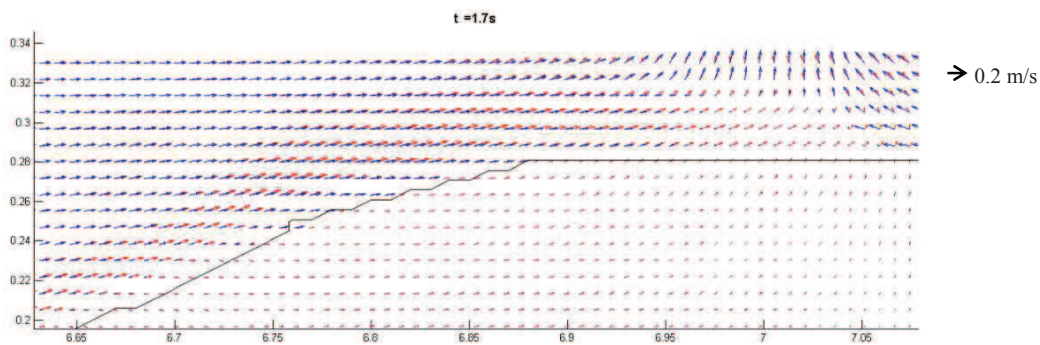


Figura 5 - Pormenor da sobreposição dos campos de velocidades instantâneas obtidas do MN e do MF, na ZI1.

As diferenças, em percentagem, entre as velocidades máximas obtidas no modelo numérico e no modelo físico estão representadas na Figura 6. Verifica-se, nas Figuras 6c e 6d, uma descontinuidade na posição $x=7.4$ m, que corresponde à secção onde se localiza uma sonda no modelo físico, a qual introduz erros na análise das velocidades.

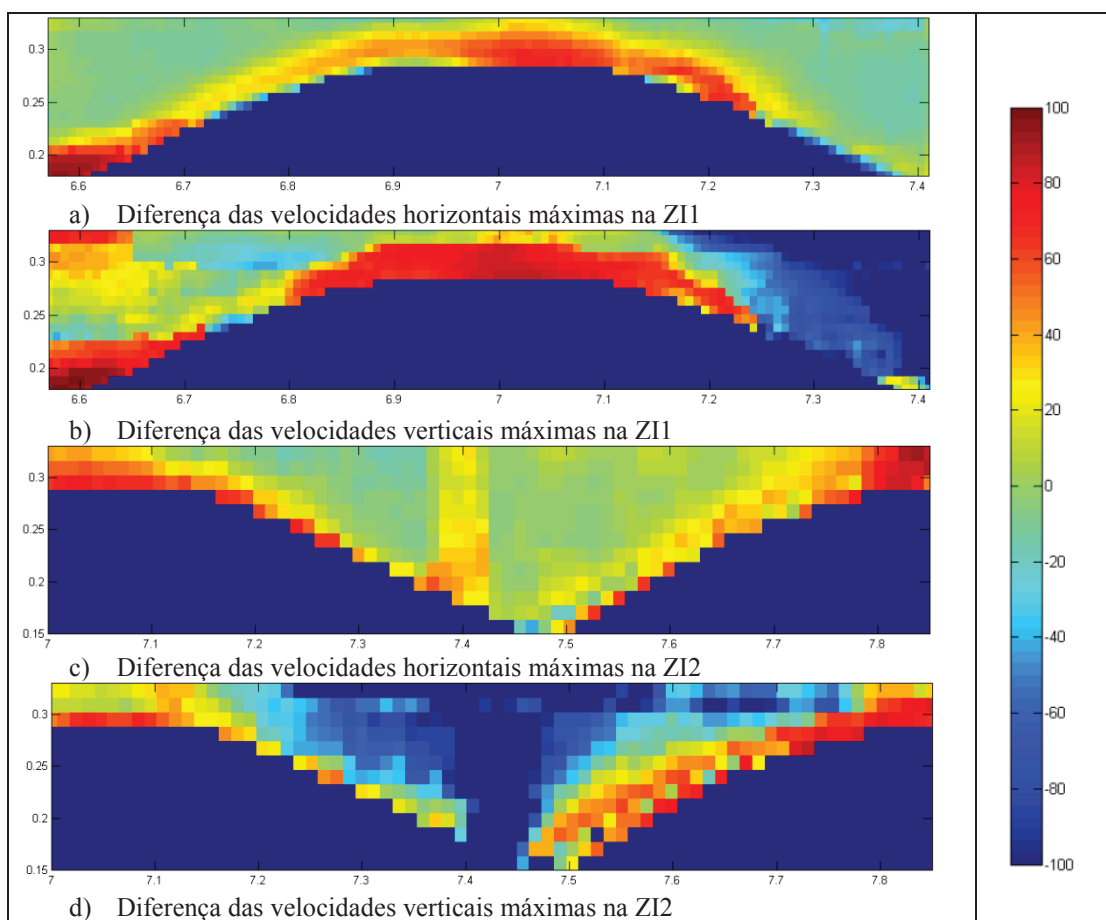


Figura 6 – Diferenças em percentagem entre o modelo numérico e o modelo físico.

Em geral, a concordância entre as velocidades máximas, nas duas zonas de interesse, é melhor em relação às velocidades horizontais do que às verticais, em especial na Z12, onde, na maior parte da sua extensão, as diferenças das velocidades máximas registadas não ultrapassam os 20% (Figura 6c). Em relação às velocidades máximas verticais, verifica-se que o modelo numérico apresenta velocidades maiores sobre o quebra-mar submerso (Figura 6b) e velocidades menores entre quebra-mares (Figura 6d), com diferenças que, em alguns casos, chegam aos 60%.

Na Figura 7 apresentam-se as séries temporais das velocidades horizontais (U) e verticais (V) dos dois modelos, para uma dada cota relativamente ao fundo (ver legenda da Figura 7), e as séries temporais de elevação da superfície livre obtidas nas sondas 2 e 3. Verifica-se que, em geral, se obtém uma boa concordância das velocidades horizontais, ao passo que, para as velocidades verticais, embora a ordem de grandeza dos valores seja concordante, as velocidades obtidas em modelo físico apresentam maiores irregularidades que no modelo numérico.

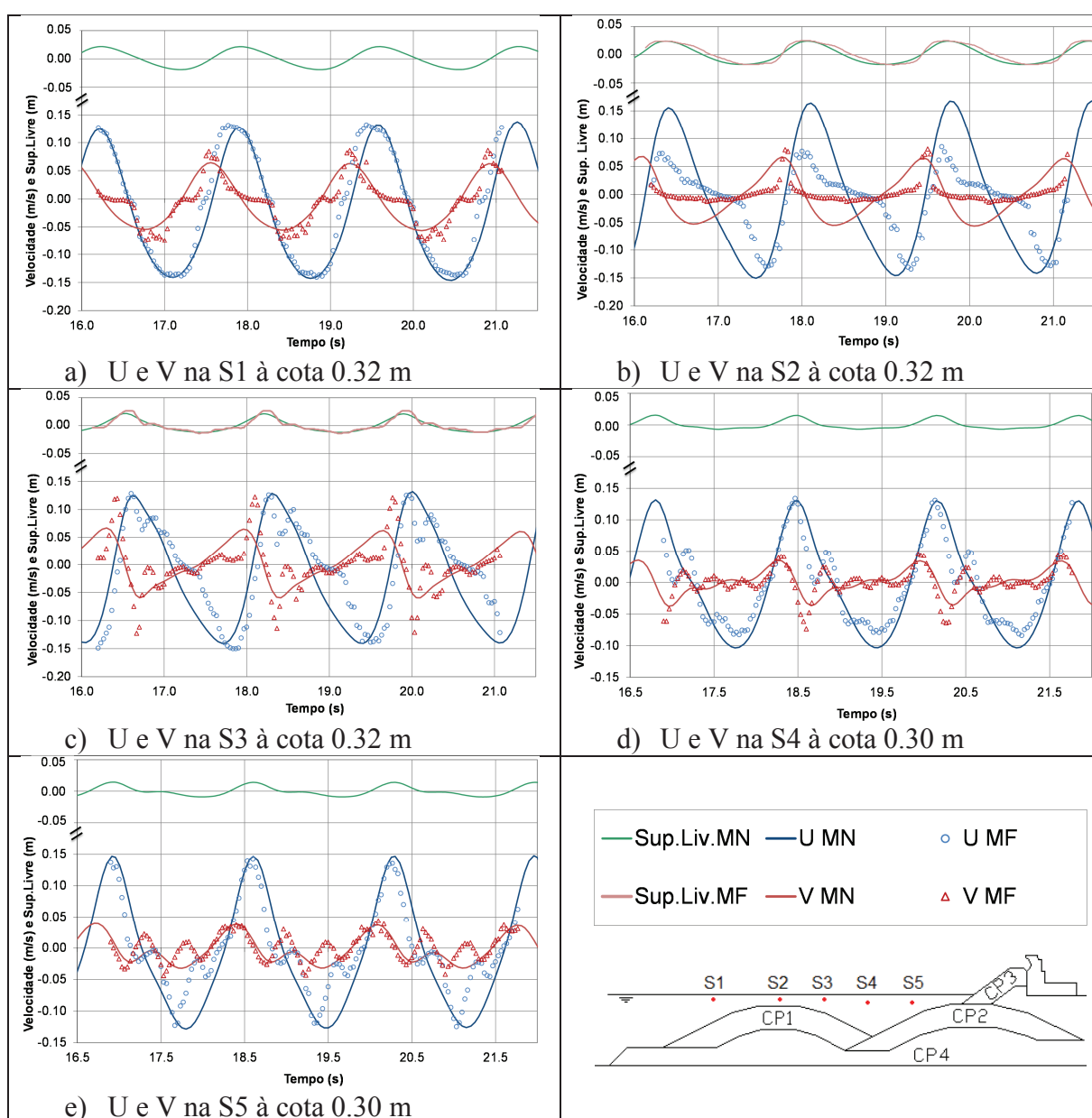


Figura 7 – Componentes U e V da velocidade nos alinhamentos das sondas.

Da análise da Figura 6a, verifica-se uma redução das velocidades horizontais máximas sobre o quebra-mar submerso no MF relativamente ao MN, sendo de esperar diferenças significativas nas séries temporais das velocidades na sonda 2. Estas diferenças podem ser observadas na Figura 7 b), onde o valor de U do MN na crista da onda é aproximadamente o dobro do valor de U registado no MF. Ao nível das velocidades verticais, o MF apresenta valores muito próximos de zero ao longo do tempo, apresentando picos de valores máximos coincidentes com os valores máximos de V do MN, na passagem por zero do ciclo de onda.

Tal como referido em [5], a análise PIV é bastante sensível a perturbações locais do escoamento e poderá apresentar resultados menos corretos em zonas onde haja grande emulsão ar-água, tipicamente associadas a zonas de rebentação. Deste modo, as diferenças das velocidades registadas sobre o quebra-mar submerso podem dever-se, em grande parte, a essas perturbações visíveis nos resultados obtidos no MF, que não permitem descrever com rigor as velocidades sobre o quebra-mar submerso. Podem ainda dever-se aos parâmetros de calibração do modelo numérico, que poderão não estar totalmente ajustados ao caso em estudo. A informação da elevação da superfície livre obtida em MF com sondas resistivas poderia ajudar bastante na calibração do modelo numérico.

Na Figura 8 apresentam-se os perfis verticais das velocidades horizontais, nas cinco sondas (ver Figura 4), correspondente à passagem da cava e da crista de onda, em que se espera que as velocidades de U sejam mínimas e máximas, respetivamente.

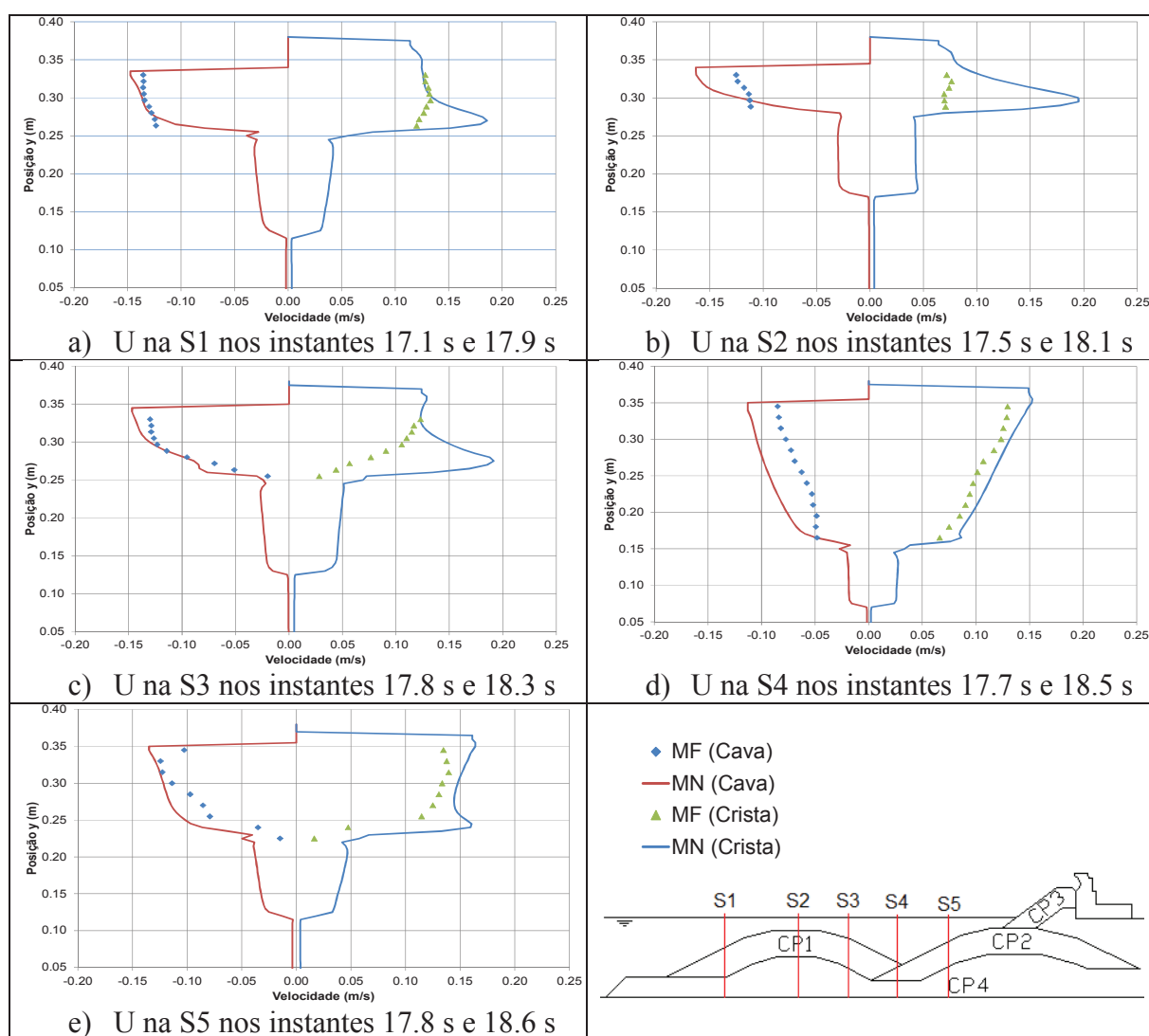


Figura 8 – Perfil vertical das velocidades horizontais nas sondas.

Os perfis de velocidades obtidos em ambos os modelos foram comparados apenas no que se refere à parte do escoamento fora das camadas porosas. No interior das camadas porosas não é possível, no modelo físico, obter as velocidades, pelo que não estão representadas nos gráficos, contudo pode-se observar o comportamento das velocidades no modelo numérico dentro das camadas porosas.

Na posição da sonda S2 (Figura 8 b), as velocidades máximas, que correspondem à passagem da crista de onda, obtidas no MF são bastante inferiores às verificadas no MN. No entanto, na passagem pela cava (velocidades mínimas) as velocidades em ambos os modelos são mais aproximadas. Na posição da sonda S4 (Figura 8 d), que corresponde a uma zona de maior turbulência, onde seria espectável haver maior variação entre os perfis de velocidades do MF e MN, existe uma boa concordância entre modelos, apresentando o MF valores de U ligeiramente inferiores aos registados no MN. Também se verifica que no MF não se observa o aumento de velocidade máxima junto ao meio poroso, como seria de esperar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo apresentam-se os perfis e campos de velocidades máximas na proximidade do quebra-mar Norte do Porto de Leixões, concretamente na zona do quebra-mar submerso e na zona entre este e o quebra-mar principal não galgável, obtidos até ao momento em modelo físico e numérico. O método utilizado para estimar as velocidades em modelo físico, com recurso a técnicas PIV, é um método muito promissor já que permite estimar todo o campo de velocidades numa determinada zona sem a intrusão de equipamento que possa alterar os valores a obter.

Este método encontra-se em desenvolvimento e a sua comparação com os resultados do modelo numérico permite verificar as suas vantagens e limitações. Da comparação dos resultados obtidos até ao momento, embora ainda preliminares, verifica-se que com uma instalação experimental com baixos pré-requisitos, com recurso a equipamento de registo e processamento de vídeo e sem necessidade de iluminação laser, é possível obter registos dos campos de velocidades em modelo físico comparáveis com os obtidos em modelo numérico.

As maiores dificuldades na comparação de resultados entre modelo físico e numérico estão relacionadas com a metodologia de aquisição e processamento PIV dos campos de velocidades no modelo físico que, pela sua complexidade, nas zonas de transição entre a parte líquida e a parte sólida, e entre a parte líquida e a parte gasosa, podem levar ao aparecimento de erros no campo de velocidades. No entanto, os resultados obtidos até ao momento permitem concluir que, em geral, se obtém uma boa concordância das velocidades horizontais entre modelos, ao passo que, para as velocidades verticais, embora a ordem de grandeza dos valores seja concordante, as velocidades obtidas em modelo físico apresentam maiores irregularidades que no modelo numérico.

No seguimento deste estudo, pretende-se aprofundar o conhecimento da hidrodinâmica de quebra-mares submersos junto a estruturas portuárias e deste modo contribuir para a sua caracterização e otimização. Para tal ir-se-á continuar a análise efetuada para outros casos de estudo, iniciando-se por um caso sem rebentação, onde os efeitos de emulsão ar-água sejam menos importantes e permitam resultados mais fiáveis do campo de velocidades em modelo físico. A realização de ensaios com medições de campo de velocidades e com medição da elevação de superfície livre em vários pontos do canal permitirá ainda afinar a calibração do modelo numérico de forma a torná-lo também mais ajustado ao caso em estudo.

Após uma rigorosa calibração será possível, no futuro e para este caso, avaliar as velocidades com recurso ao modelo numérico IH-2VOF, com pequenas variações na geometria, clima de agitação, onde se inclui agitação regular e irregular, e diferentes níveis de maré, sem a necessidade de ensaios físicos, os quais se tornam morosos e dispendiosos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do Projeto Destaq (PTDC/ECM/100887/2008).

REFERÊNCIAS

1. F.V. Gomes, F.T. Pinto, E.B. Dias, H.G. Lopes, “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 (2009).
2. I.J. Losada, J.L. Lara, R. Guanche e J.M. Gonzalez-Ondina, “Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters”, *Coastal Engineering*, 55(1), 47-62 (2008).
3. 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).
4. M. Raffel, C. Willert, S. Wereley e J. Kompenhans, “*Particle Image Velocimetry: A Practical Guide.*”, Springer-Verlag, New York (2007).
5. H.G. Lopes, F.T. Pinto, F.V. Gomes, J.P. Cabral, R.M. Sánchez, M.G. Neves e M.T. Reis, “Análise bidimensional do comportamento hidrodinâmico de estruturas costeiras através de ferramentas de processamento de imagem”, *Proc. 7^{as} JPECP*, Porto, Portugal (2011).
6. R. Molina, M. Ortega, J. Moyano e M. A. Losada, “Analysis of the wave interaction with rubble-mound breakwaters using video imagery techniques”, *Proc. Mediterranean Days*, PIANC, Palermo, Itália (2008).
7. W. Thielicke, “PIVlab - time-resolved particle image velocimetry (PIV) tool”, 19 de Maio de 2010 (atualizado a 12 de Julho de 2011), Código ao abrigo das licenças BSD.
8. 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).
9. 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).
10. I.J. Losada, J.L. Lara, E.D. Christensen e N. Garcia, “Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters”, *Coastal Engineering*, 52, 887-913 (2005).
11. 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).
12. M.G. Neves, M.T. Reis, I.J. Losada, M.ASCE e K. Hu, “Wave Overtopping of Póvoa de Varzim Breakwater: Physical and Numerical Simulations”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(4), 226-236 (2008).
13. R. Guanche, I.J. Losada, J.L. Lara, “Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability”, *Journal of Coastal Engineering*, 56, 543-558 (2009).
14. 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, Espanha (2011).
15. J.F. Gadelho, M.G. Neves, M.T. Reis, F.T. Pinto 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).