

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS REGULARES NUM CANAL TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO O CÓDIGO IHFOAM

José M. P. Conde¹, J. M. S. M. Cardoso¹, Conceição J. E. M. Fortes²

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL)
Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial (UNIDEMI)
Campus de Caparica, 2829-516 Monte de Caparica, Portugal

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA)
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
e-mails: jpc@fct.unl.pt; jm.cardoso@campus.fct.unl.pt; jfortes@lneec.pt

RESUMO

O conhecimento das características de propagação, transformação e rebentação das ondas próximo da costa é fundamental para estudos de hidrodinâmica e para o projeto de estruturas costeiras e portuárias.

No presente artigo apresentam-se as simulações numéricas feitas utilizando o pacote de *software* OpenFOAM®, recorrendo ao *solver* IHFoam, para simular a propagação de ondas regulares sem rebentação num canal tridimensional. O código numérico resolve as equações de Navier-Stokes em regime transitório e utiliza um esquema do tipo VoF (*Volume of Fluid*) para identificar a superfície livre. Foi considerada uma onda regular incidente com 1,5 s de período e 0,1 m de altura. Esta é uma das condições de entre o vasto conjunto de ensaios em canal de ondas, realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) cujo objetivo foi a análise da hidrodinâmica da propagação de ondas sobre um fundo de batimetria variável, para várias condições de agitação incidente.

São feitas comparações entre os resultados numéricos e os experimentais. Estas comparações incluem: evoluções temporais de sondas de nível em várias localizações ao longo do canal e correspondentes espectros de amplitude; evolução da altura significativa e do período médio das ondas ao longo do canal; evolução temporal das componentes da velocidade em localizações selecionadas no canal e distribuição bidimensional dessas componentes.

Constata-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas bem como a diferenças entre a forma de geração e dissipação de ondas entre o numérico e o experimental.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica, OpenFOAM, IHFoam, canal de ondas, ondas regulares, propagação de onda, análise espectral, análise temporal.

1. INTRODUÇÃO

A modelação física da propagação de ondas em fundos complexos e de profundidade variável é fundamental para um melhor conhecimento e caracterização da forma como a onda se propaga e de como se processa a sua rebentação. É com este objetivo que tem sido realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) um extenso conjunto de ensaios em canal de ondas, para a análise da transformação e rebentação de ondas sobre fundos de batimetria complexa, em várias condições de agitação incidente. As análises temporais, espectrais e estatísticas realizadas contribuem para um melhor conhecimento da hidrodinâmica da

propagação e rebentação das ondas e fornecem resultados importantes para a validação de modelos numéricos.

Neste âmbito, Okamoto *et al.* (2010), Endres *et al.* (2011), Neves *et al.* (2011, 2012) e Conde *et al.* (2012) efetuaram ensaios em canal para condições de agitação regular incidente que originam ondas com e sem rebentação, para diferentes batimetrias de fundo. Na sequência destes trabalhos, Conde *et al.* (2013a, 2013b) testaram condições de agitação incidente bicromáticas e que conduzem a situações com e sem rebentação e Conde *et al.* (2013c) consideraram condições de agitação incidente irregulares (espectro JONSWAP) com rebentação, para a mesma batimetria de fundo.

No âmbito da engenharia costeira os códigos de resolução numérica são tradicionalmente baseados em equações do tipo Boussinesq. Recentemente, graças ao aumento da capacidade computacional, os códigos que resolvem as equações de Navier-Stokes em valor médio, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), tornaram-se de uso mais generalizado. As equações RANS têm a vantagem de permitir determinar, por exemplo, as características da turbulência que ocorre na zona de rebentação e os esforços resultantes dos impactos das ondas nas estruturas costeiras.

Neste artigo são apresentadas simulações numéricas de propagação de ondas regulares sem rebentação num canal tridimensional utilizando o pacote de *software* OpenFOAM®, recorrendo ao *solver* IHFoam. Estas simulações numéricas correspondem a um dos ensaios experimentais efetuados por Conde *et al.* (2012).

2. Código OpenFOAM®

O OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) é um pacote de *software* (bibliotecas), em linguagem de programação C++, gratuito e de código fonte aberto (*Open Source*) que pode ser utilizado para a resolução de problemas de mecânica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), entre outros. O OpenFOAM® dispõe e permite criar aplicações que se dividem em duas categorias: *Solvers*, que são desenvolvidos para resolver um problema específico; e *Utilities*, que são concebidos para executar tarefas que envolvem a manipulação e processamento de dados (OpenFOAM, 2013). O código OpenFOAM® é tradicionalmente compilado em sistema operativo Linux. Nas simulações efectuadas neste trabalho foi utilizada a versão OpenFOAM® 2.2.2, instalada em sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS.

Foi utilizado o *solver* interFoam que permite resolver escoamentos bifásicos com superfície livre. Este *solver* resolve as equações RANS, Eq. (1), e da continuidade, Eq. (2), para dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, juntamente com a equação de transporte da fracção de volume, α , que toma o valor 0 no ar e 1 na água, Eq. (3).

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T] = -\nabla \cdot p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}] + \sigma_T \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (3)$$

Nestas equações, $\mathbf{u} = (u \ v \ w)$ é o campo de velocidades em coordenadas cartesianas $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$, p^* é a pressão subtraindo a componente hidrostática, \mathbf{g} a aceleração gravitacional, ρ a massa específica e μ a viscosidade dinâmica molecular. O último termo da Eq. (1) contabiliza o efeito da tensão superficial, onde σ_T é a tensão superficial e κ_α a curvatura da superfície. O tensor das tensões de Reynolds é definido pela Eq. (4) onde μ_t é a

viscosidade turbulenta e k a energia cinética turbulenta. Na equação de transporte da fração de volume, Eq. (3), o último termo do membro esquerdo é um termo compressivo estabilizador da superfície livre, sendo \mathbf{u}_r é a velocidade relativa (Jacobsen *et al.*, 2012).

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t \left[\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (4)$$

Este solver utiliza o método limitador multidimensional universal para solução explícita, MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*), para manter os limites da fração de volume independentes do esquema numérico e da estrutura da malha. O algoritmo utilizado pelo solver é o PIMPLE, que é uma combinação dos algoritmos PISO e SIMPLE (OpenFOAM, 2013, IHFOAM, 2014).

Recentemente foram desenvolvidos dois *solvers*, baseados no interFOAM, para resolver problemas de engenharia costeira: waves2Foam (Jacobsen *et al.*, 2012) e IHFoam (Higuera, 2015, IHFOAM, 2014, Higuera *et al.*, 2013), que apresentam potencial para resolver a grande maioria dos problemas associados a estruturas costeiras.

O waves2Foam dispõe de um conjunto de utilitários utilizados para gerar e absorver ondas de superfície. Actualmente, o método aplica zonas de relaxamento de forma arbitrária para a absorção de ondas e tem disponível um grande número de teorias para geração de onda.

O *solver* IHFoam também permite um grande número de teorias de geração de ondas, mas permite ainda a absorção ativa de ondas e a utilização de meio poroso. O IHFoam resolve as equações VARANS (*Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para dois fluidos incompressíveis e imiscíveis com zona porosa. Em simulações sem zona porosa resolve apenas as equações RANS.

Para além destes dois *solvers*, a geração de ondas pode ainda ser obtida pela técnica mais simples: imposição de perfis de velocidade e posição da superfície livre, recorrendo ao utilitário GroovyBC.

Nas simulações efetuadas foi utilizado o *solver* IHFoam considerando escoamento laminar.

2. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os testes experimentais foram realizados num canal com 32,57 m de comprimento útil (Figuras 1 e 2). Este canal, construído nos anos 50 do século XX, foi projetado com uma redução da área da secção transversal de modo a melhorar o seu comportamento hidráulico, minimizando o aparecimento de ondas transversais indesejadas. Adicionalmente, esta redução de secção permite obter ondas com maior altura (devido ao seu empolamento na rampa com inclinação 1:11) do que as originadas pelas capacidades limitadas do gerador de ondas regulares original. Actualmente o canal está equipado com um gerador de ondas regulares/irregulares do tipo pistão controlado por uma placa de conversão A/D ligada a um computador pessoal.

O gerador dispõe de um sistema de absorção dinâmica de ondas refletidas (Capitão e Conde, 2012). No entanto, nos ensaios realizados no âmbito deste artigo, este sistema não foi ativado, podendo-se deste modo garantir que, em todos os ensaios, as ondas são sempre geradas do mesmo modo, evitando as correções do movimento do gerador de ondas que poderiam diferir de ensaio para ensaio.

Após a rampa de declive 1:11 foi construída uma rampa em cimento impermeável com 10 m de extensão e declive 1:22, seguida de uma zona horizontal com 10 m de extensão e outra rampa de declive 1:20 e, por fim, uma zona de enrocamento com declive 1:2. Foram colocados tapetes porosos no declive 1:20 para reduzir a energia das ondas refletidas. O canal em planta tem uma zona inicial com largura constante de 1 m, seguida de um troço convergente, e finalmente, uma zona também com largura constante de 0,6 m (Figura 2).



Figura 1. Vista lateral do canal (esquerda), gerador de ondas (centro) e vista de cima do canal (direita).

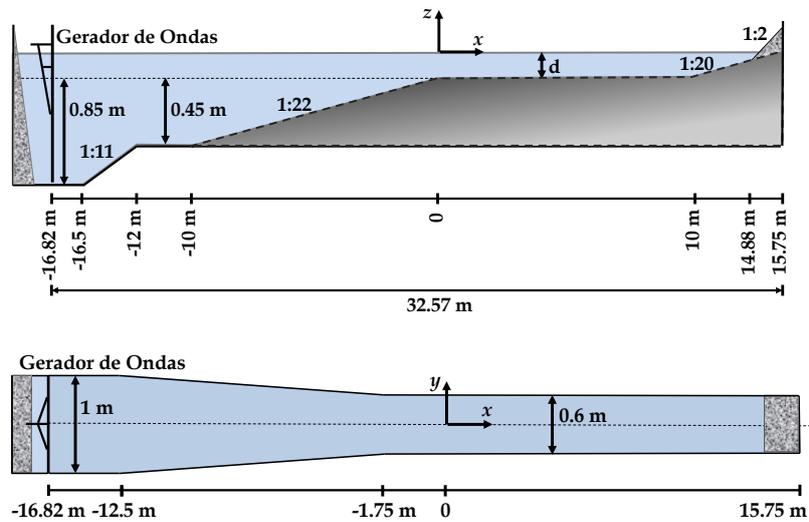


Figura 2. Canal de ondas: perfil longitudinal (cima) e planta (baixo).

Os ensaios experimentais foram realizados em três fases principais, correspondendo a diferentes condições de agitação incidente:

- Ondas regulares, com um de quatro períodos de onda ($T=1,1$ s; 1,5 s; 2,0 s; e 2,5 s) e uma de seis alturas de onda ($H=0,08$ m; 0,10 m; 0,12 m; 0,14 m; 0,16 m e 0,18 m) (Okamoto *et al.*, 2010, Endres *et al.*, 2011, Neves *et al.*, 2011, 2012, e Conde *et al.*, 2012);
- Ondas bicromáticas resultantes da combinação de dois dos períodos das ondas regulares anteriores considerando uma determinada altura de onda, *i.e.*, $T=1,1$ s e 1,5 s e $H=0,05$ m ou 0,08 m (Conde *et al.*, 2013a, 2013b);
- Ondas irregulares (espectro JONSWAP) com período de pico $T_p=1,5$ s e quatro diferentes alturas significativas de onda ($H_s=0,12$ m; 0,14 m; 0,16 m e 0,18 m); $T_p=2,0$ s e $H_s=0,14$ m; e $T_p=2,5$ s e $H_s=0,14$ m (Conde *et al.*, 2013c).

Foram considerados dois níveis de água a sotamar da rampa de declive 1:22 (na origem do referencial $Oxyz$, Figura 2), $d=0,1$ m e 0,3 m, de modo a obter condições com e sem rebentação, respetivamente.

Nos ensaios experimentais foi efetuada a medição: da elevação da superfície livre ao longo do canal; das componentes da velocidade das partículas no centro da coluna de água; e de perfis verticais das componentes de velocidade das partículas em posições selecionadas ao longo do canal.

Os valores de elevação da superfície livre ao longo da direção longitudinal do canal, eixo dos xx , foram medidos com o recurso a oito sondas resistivas alinhadas e espaçadas de 20 cm entre si e solidarizadas a uma estrutura móvel (Figura 3 - esquerda). Esta estrutura foi colocada em diferentes localizações ao longo do canal de forma a obter medições entre as posições $x=-10$ m e $x=10$ m. Para todos os ensaios experimentais foi colocada uma sonda de nível a 6 m do batedor, após a rampa de declive 1:11, na posição $x=-10,8$ m (Figura 3 - centro). Esta sonda foi mantida nesta posição para controlar a geração de ondas.

As medições da velocidade foram efetuadas usando um velocímetro acústico Doppler (ADV - *Acoustic Doppler Velocimeter*), o qual fornece as três componentes ortogonais da velocidade instantânea das partículas em suspensão na coluna de água, numa posição de análise (volume de medição). Junto ao ADV foi colocada uma sonda resistiva (Figura 3 - direita), para que, conjuntamente com a velocidade das partículas, seja também medida a elevação da superfície livre, na mesma secção transversal do canal. A frequência de aquisição para todas as medições, sondas de nível e ADV, foi de 25 Hz.



Figura 3. Conjunto de 8 sondas de nível (esquerda), sonda de nível junto ao batedor (centro) e sondas ADV e de nível (direita).

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas de propagação de ondas regulares sem rebentação foram efetuadas com o *solver* IHFoam e correspondem aos ensaios experimentais efetuado por Conde *et al.* (2012) para $d=0,3$ m, $T=1,5$ s e $H=0,1$ m.

O domínio computacional tem uma geometria semelhante à do canal experimental, apenas não tem as rampas finais de declive 1:20 e 1:2, Figura 4. Nesta figura identificam-se os nomes atribuídos a cada fronteira: *bottom* identifica o fundo do canal; *atmosphere* identifica o topo do domínio, está localizada em $z = 0:3$ m e representa a atmosfera; *inlet* e *outlet* representam as fronteiras de geração e absorção de ondas; *sideWall* representa a parede lateral do canal. Devido à simetria do canal em relação a $y = 0$, o domínio computacional foi reduzido para metade, considerando $y = 0$ como plano de simetria do escoamento, *symmetryPlane*.

Ao longo do canal foram colocadas sondas numéricas entre $x=-10$ m e $x=10$ m, para a identificação da superfície livre, S1 a S100, e avaliação das componentes da velocidade, P1 a P100, na Figura 4 encontram-se representadas 5 dessas sondas. A superfície livre é obtida por integração do valor da fração de volume, α , ao longo de uma linha vertical.

A malha de discretização do domínio, Figura 5, foi gerada através do utilitário snappyHexMesh que modifica uma malha de base criada pelo blockMesh. No blockMesh foram criados três blocos da malha rectangulares:

- Um intermédio na zona da superfície livre, com uma altura de onda acima e abaixo desta, composto por 14 elementos iguais por altura de onda;
- Acima do bloco anterior é definido um bloco elementos de dimensão crescente até à fronteira superior.

- O terceiro bloco estende-se desde a zona da superfície livre até ao fundo do domínio $z=-1,15\text{m}$.
O número de elementos por comprimento de onda é 145. A direção transversal é discretizada por 10 elementos uniformemente distribuídos.

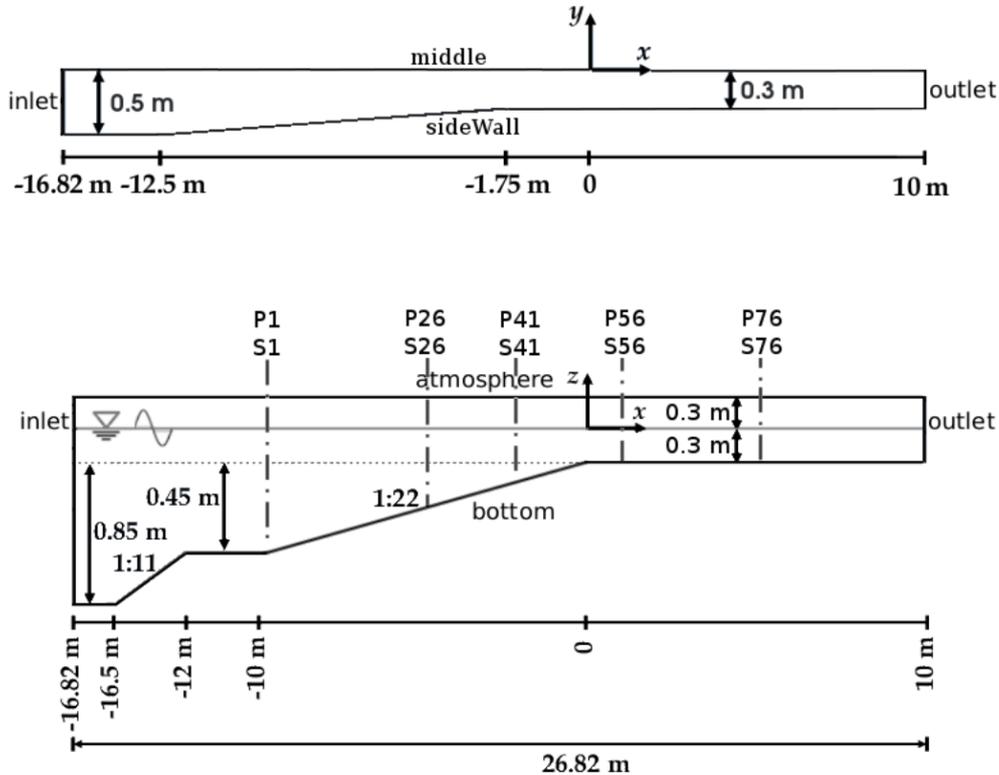


Figura 4. Domínio computacional, identificando os nomes das fronteiras do domínio e a representação de algumas das sondas.

Aplicando o snappyHexMesh a malha é recortada pela configuração do fundo, que foi desenhada em CAD e os elementos recortados são adaptados a esta configuração. Foi ainda criada uma camada de 4 elementos mais refinados junto à parede do fundo ao longo de todo o canal, por forma a captar melhor a camada limite no fundo. No total a malha é composta por aproximadamente $9,4 \times 10^5$ volumes finitos.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Foram simulados 200 s, com um passo de tempo de 0,001 s. O tempo de simulação foi de aproximadamente de 7 dias, 18 horas e 31 minutos num processador Intel® Core™ i7-5820K@ 3.3GHz×12 com 32GB de RAM utilizando 12 cores em paralelo.

Na Figura 6 estão representadas as elevações da superfície e espetros de amplitude, para 20 períodos de onda incidente, nas secções $x = -10, -5, -2, 1$ e 5 m para a simulação numérica juntamente com os resultados experimentais. Os espetros foram obtidos pela aplicação da transformada discreta de Fourier (DFT). Observa-se a transformação da onda à medida que esta se propaga ao longo do canal para zonas de menor profundidade. Nota-se que a forma da onda apresenta uma evolução para características cada vez mais não-lineares (cristas mais acentuadas e cavas mais alongadas). Os resultados mostram que à medida que a onda se propaga para zonas pouco profundas a amplitude das harmónicas, praticamente inexistentes a montante, começam a ter importância. O crescimento da amplitude da frequência fundamental devido ao efeito do empolgamento é menor na simulação numérica do que nos dados experimentais, o que pode ser atribuído à dissipação numérica.

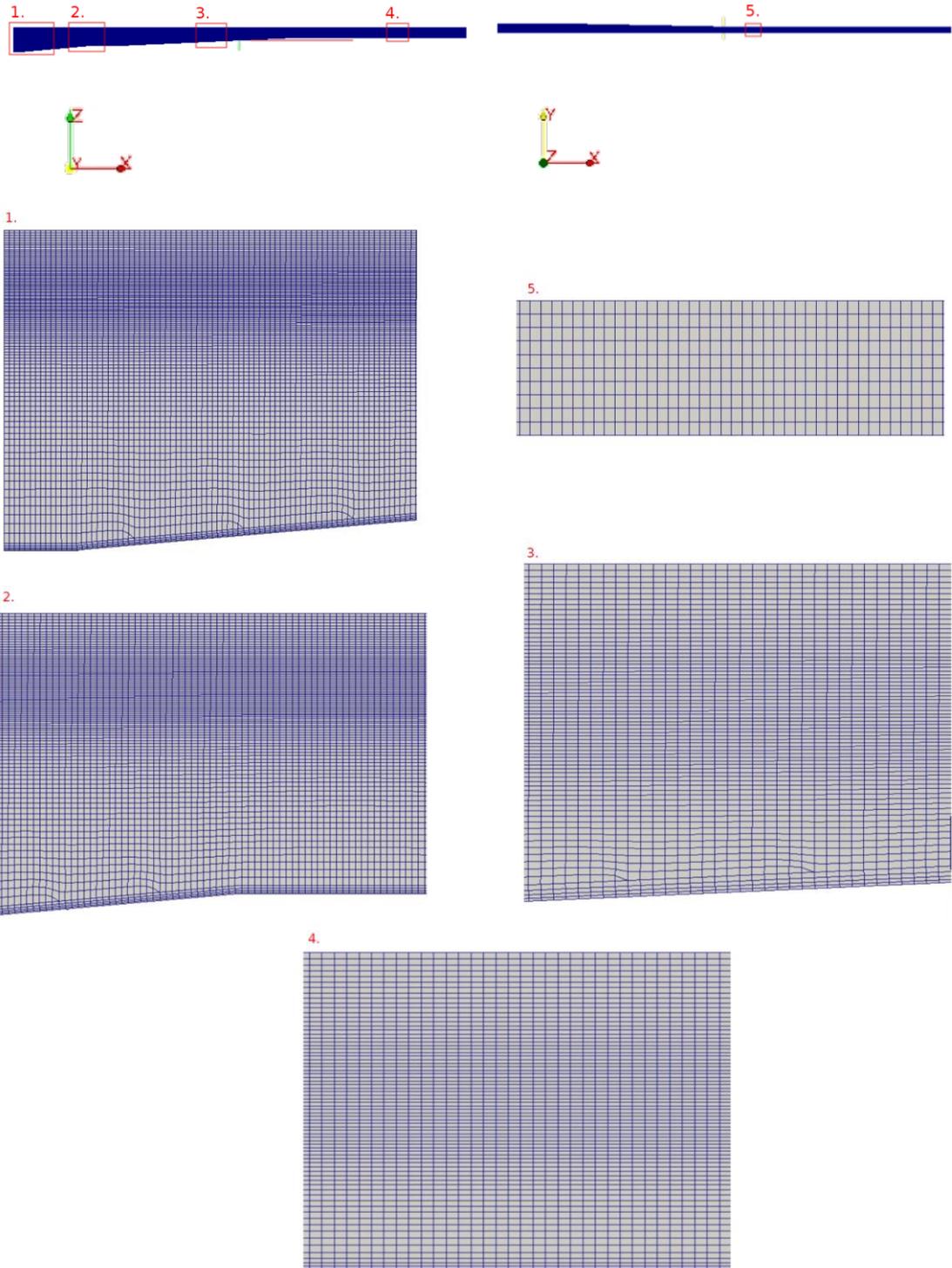


Figura 5. Malha de discretização: totalidade do domínio e pormenores em zonas identificadas.

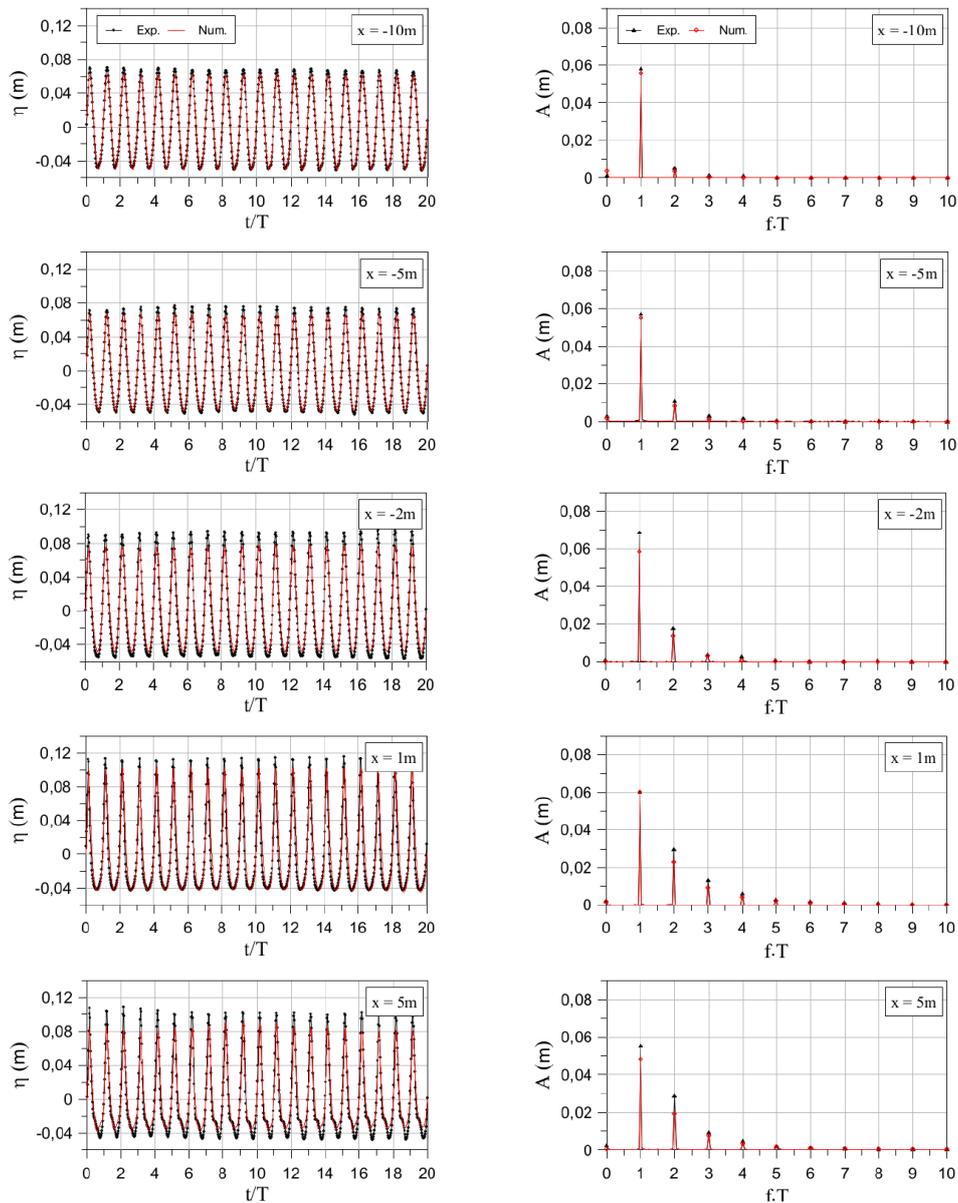


Figura 6. Série temporal e espectro de amplitudes da elevação da superfície livre experimental e numérica para uma onda regular incidente ($T = 1,5$ s, $H = 0,1$ m e $d = 0,3$ m) para diferentes secções ao longo do canal.

A Figura 7 apresenta os valores numéricos e experimentais da altura significativa da onda, H_s e o período médio da onda, T_{av} . Verifica-se um aumento da altura significativa ao longo do canal até $x = 0$, tanto para o numérico como para o experimental, devido ao estreitamento do canal. Para $x > 0$, a altura de onda significativa já não aumenta, mas apresenta oscilações que indicam reflexão da onda no fim do canal, tendo as oscilações amplitude semelhantes tanto nos resultados numéricos como nos experimentais. O período médio de onda mantém-se aproximadamente constante ao longo do canal em ambos os resultados.

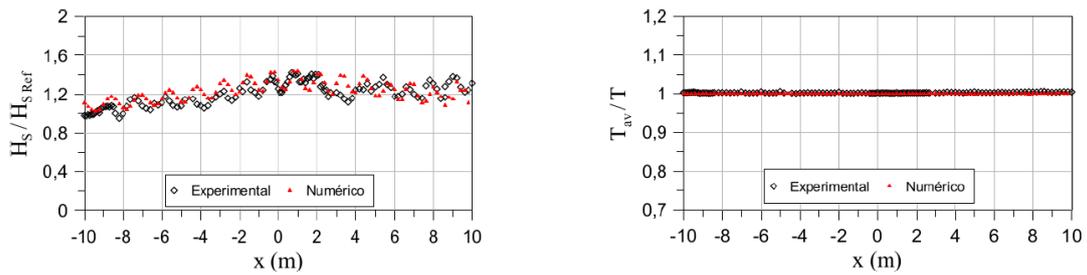


Figura 7. Altura significativa H_s e período médio T_{av} de onda ao longo do canal, para uma onda regular incidente ($T = 1,5$ s, $H = 0,1$ m e $d = 0,3$ m).

Na Figura 8 (esquerda) está representada a comparação da evolução das três componentes da velocidade em função do tempo, durante 20 períodos. Observar-se que: para a componente V_x os resultados obtidos nesta simulação são bastante próximos dos experimentais; para a componente V_y a velocidade é praticamente nula no caso numérico, como seria de esperar face à forma como a onda foi gerada; para a componente V_z , verifica-se que no caso numérico a amplitude é ligeiramente superior à obtida experimentalmente, tomando valores próximos dos obtidos para V_x , o que mostra que a onda simulada tem características lineares que diferem da onda experimental.

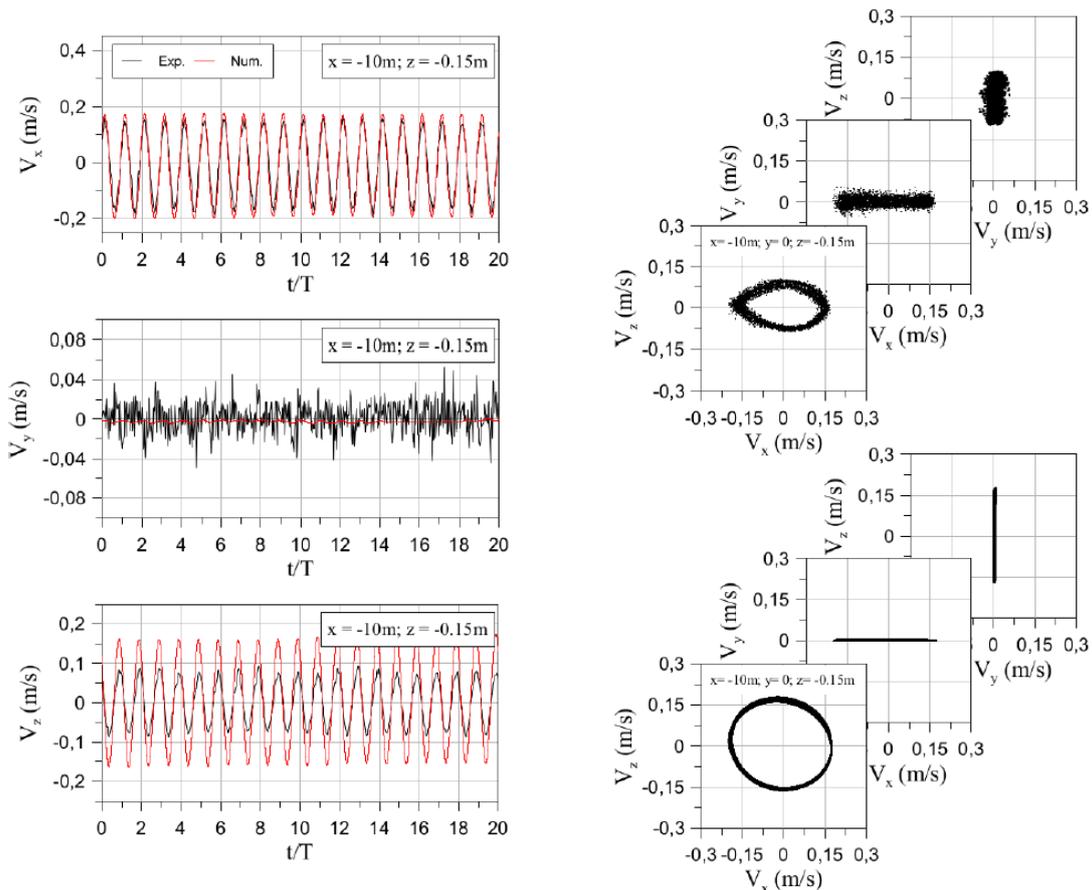


Figura 8. Séries temporais, experimentais e numéricas, das componentes da velocidade (esquerda) e distribuição bidimensional das componentes da velocidade (hodógrafo) nos planos xy , xz e yz (experimental: direita – cima; numérico: direita - baixo), para a posição $x=10$ m, $y=0$ e $z=-0,15$ m.

Na Figura 8 (direita) faz-se uma representação num diagrama hodógrafo da distribuição das componentes da velocidade nos planos xy , xz e yz para a secção $x=-10\text{m}$. É visível que, para o plano xz , no caso experimental, as componentes da velocidade geram uma órbita elíptica, enquanto para a simulação numérica, a órbita é praticamente circular, pois as componentes V_x e V_z tomam valores aproximados ao longo do tempo. Para os planos xy e yz observa-se uma trajetória linear em ambos os casos, pois para o caso experimental a componente V_y toma valores próximos do 0 e no caso numérico a componente V_y é praticamente nula.

Na Figura 9, encontra-se representada a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano xz para diferentes posições ao longo do canal de ondas. Verifica-se que no estudo experimental as órbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal, consequência directa da diminuição da profundidade e do estreitamento, verificando-se mesmo o achatamento para $x=-2\text{ m}$. No caso da simulação numérica, verifica-se que para a posição de $x=-10\text{ m}$ as partículas possuem órbitas praticamente circulares e que estas órbitas se vão tornando elípticas e mais alongadas ao longo do domínio, tal como no caso experimental. No entanto, uma análise mais atenta permite verificar que, embora achatadas, as distribuições são diferentes, particularmente para V_x negativo e $V_z=0$.

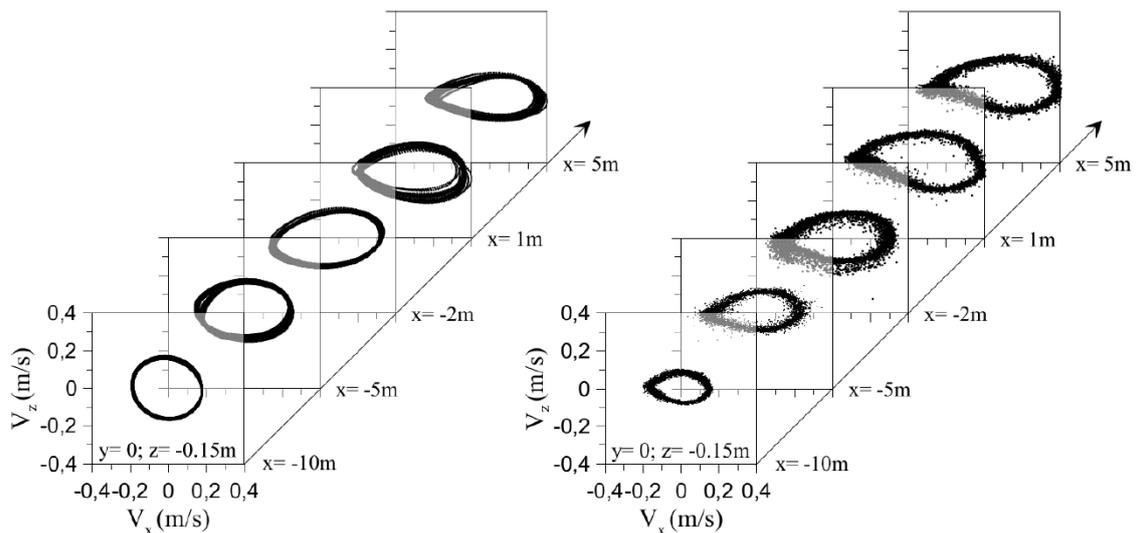


Figura 9. Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano xz (esquerda – numérico; direita – experimental), para as posições $x=-10, -5, -2, 1$ e 5 m , $y=0$ e $z=-0,15\text{ m}$.

A Figura 10 apresenta os valores mínimo, médio e máximo da componente longitudinal da velocidade ($V_{x\text{ min}}$, $V_{x\text{ av}}$ e $V_{x\text{ max}}$) ao longo do canal. Observa-se um ligeiro aumento do valor absoluto de $V_{x\text{ max}}$ e $V_{x\text{ min}}$, devido à diminuição da profundidade até $x = 0$, tanto nos resultados numéricos como nos experimentais. Para $x > 0$, ambos os valores são praticamente constantes. Note-se que a simetria entre os valores $V_{x\text{ max}}$ e $V_{x\text{ min}}$ não se mantém, sendo o valor de $V_{x\text{ max}}$ superior ao valor absoluto de $V_{x\text{ min}}$ (propagação de ondas com características mais não-lineares).

A Figura 11 apresenta os perfis verticais de valores mínimos, médios e máximos, da componente longitudinal da velocidade, para posições selecionadas ao longo do canal. Verifica-se uma quase simetria entre os valores máximo e mínimo para as regiões de maior profundidade do canal. À medida que a onda se propaga pelo canal, essa simetria vai sendo perdida, no entanto o valor médio mantém-se próximo de zero. Isto deve-se ao efeito de empolgamento. Existe alguma variabilidade nos valores experimentais que pode estar relacionada com imprecisões nas medições da velocidade.

A Figura 12 representa o gráfico tipo *waterfall* do caso de estudo numérico. Através deste gráfico é possível verificar a existência de ondas refletidas significativas e avaliar a onda num todo durante o tempo de simulação e ao longo do canal. São representados 80 s de simulação.

Não se observa a ocorrência significativa de reflexão, que seria claramente visível através de uma linha de declive negativo, que não se verifica. Verifica-se, no entanto, algumas oscilações que se manifestam mais a partir de $x > 0$, a partir da zona de menor profundidade, depois da variação de profundidade, que podem estar relacionadas com um possível início de rebentação depois do empolgamento, uma vez que esta onda que se encontra perto dos limites de rebentação.

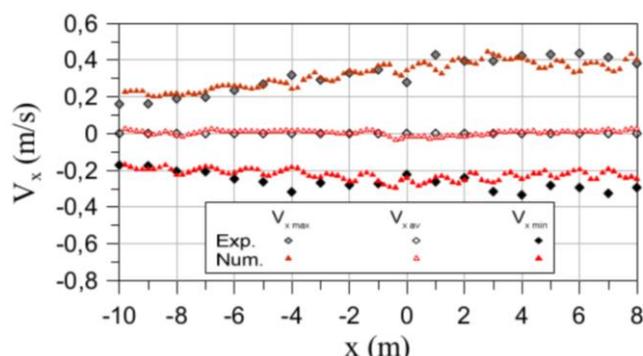


Figura 10. Valores mínimo, médio e máximo da componente longitudinal da velocidade ($V_{x,min}$, $V_{x,av}$ e $V_{x,max}$) ao longo do canal.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se as simulações numéricas feitas utilizando o pacote de *software* OpenFOAM®, recorrendo ao *solver* IHFoam, para simular a propagação de ondas regulares sem rebentação num canal tridimensional. Foi considerada uma onda regular incidente com 1,5 s de período e 0,1 m de altura. Esta é uma das condições de entre o vasto conjunto de ensaios em canal de ondas realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) cujo objetivo foi a análise da hidrodinâmica da propagação de onda sobre um fundo de batimetria variável, para várias condições de agitação incidente. Foram feitas comparações entre os resultados numéricos e os experimentais.

Constatou-se que, em ambos os casos, numérico e experimental, se verifica que à medida que a profundidade do canal diminui e este estreita, aumenta a amplitude das harmónicas. As sondas de superfície livre mostram um comportamento semelhante para ambos os casos. Verifica-se também que ocorre um aumento da altura significativa da onda ao longo do canal devido ao efeito da redução de área da secção transversal e da diminuição da profundidade.

Na comparação da evolução das três componentes da velocidade em função do tempo pode observar-se que: para a componente V_x os resultados obtidos nesta simulação são bastante próximos dos experimentais; para a componente V_y a velocidade é praticamente nula no caso numérico, como seria de esperar, face à forma como a onda foi gerada; para a componente V_z verifica-se que, no caso numérico, a amplitude é ligeiramente superior à obtida experimentalmente, tomando valores próximos dos obtidos para V_x , o que mostra que a onda simulada tem características lineares que diferem da onda experimental.

Pela representação num diagrama hodógrafo da distribuição das componentes da velocidade nos planos xy , xz e yz , constata-se que as componentes da velocidade geram uma órbita elíptica para os dados experimentais, enquanto para a simulação numérica, a órbita é praticamente circular.

Pela distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano xz para diferentes posições ao longo do canal, verifica-se que, no estudo experimental, as órbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal, consequência direta da diminuição da profundidade e do estreitamento, verificando-se mesmo o achatamento para $x=-2$ m.

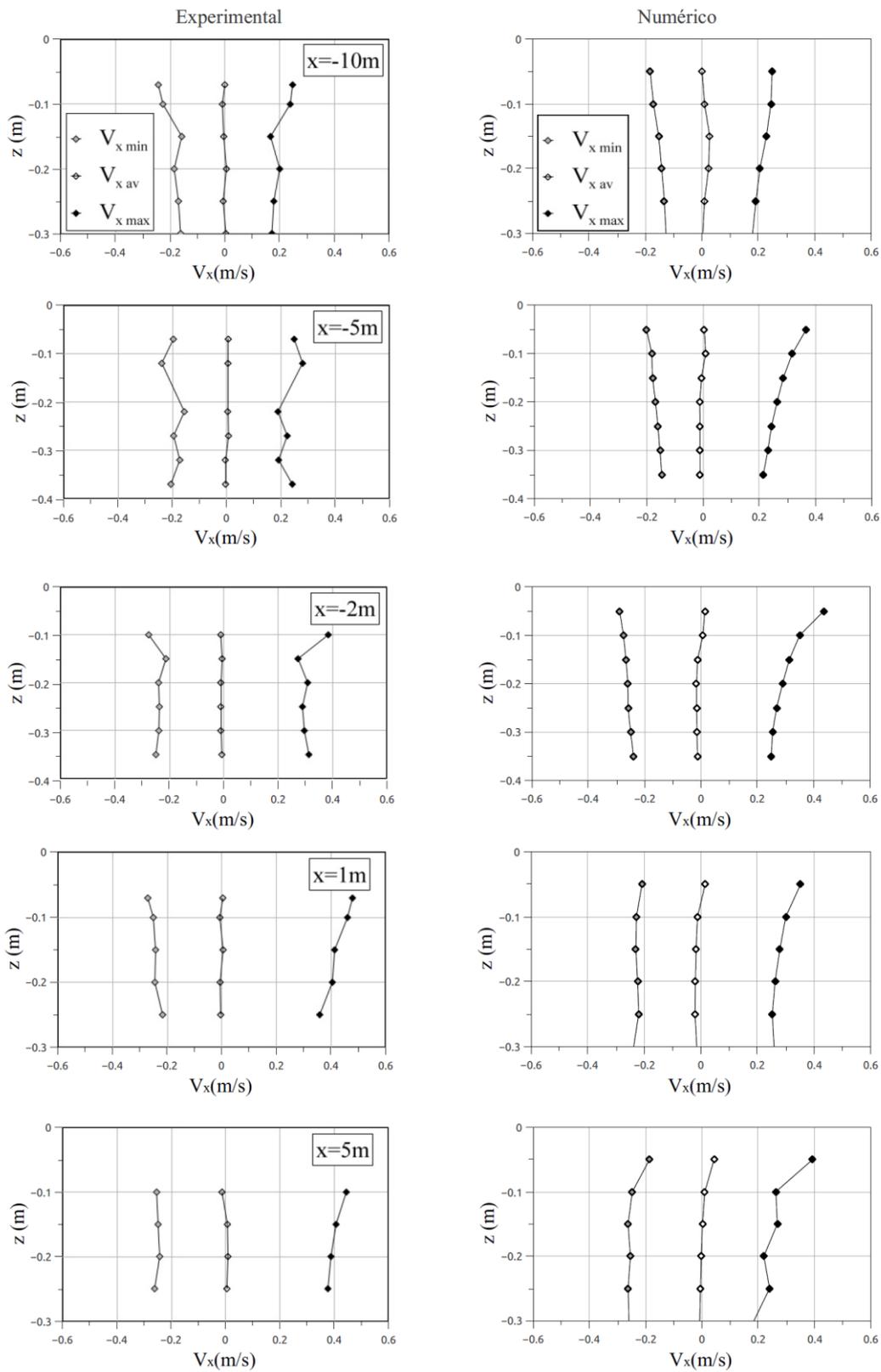


Figura 11. Perfis verticais de valores mínimos, médios e máximos, da componente longitudinal da velocidade para posições selecionadas ao longo do canal.

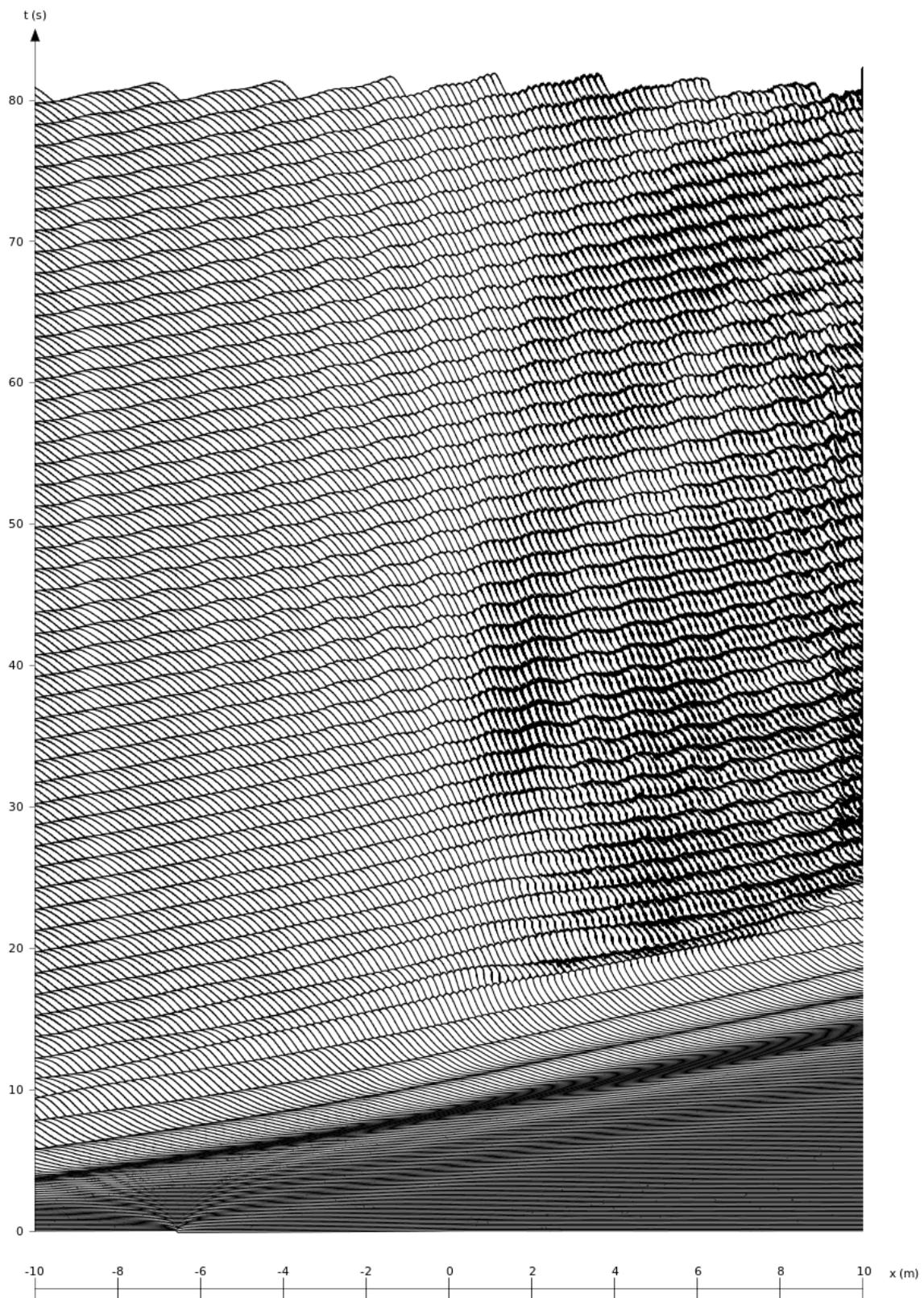


Figura 12. Gráfico do tipo *waterfall*, que relaciona a elevação de superfície livre da onda, com a posição ao longo do canal e com o tempo.

No caso da simulação numérica, verifica-se que para a posição de $x=-10\text{m}$ as partículas possuem órbitas praticamente circulares e que estas orbitas se vão tornando elípticas e mais alongadas ao longo do domínio, tal como no caso experimental. No entanto, uma análise mais atenta permite verificar que, embora achatadas, as distribuições são diferentes, particularmente para V_x negativo e $V_z \sim 0$.

Conclui-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas bem como a diferenças entre a forma de geração e absorção das ondas entre o numérico e o experimental.

AGRADECIMENTOS

O trabalho experimental desenvolvido foi efetuado no âmbito da licença sabática de José M. P. Conde no LNEC. Os autores agradecem o financiamento do Plano Estratégico de Unidades de I&D da Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial – UNIDEMI (UID/EMS/00667/2013).

REFERÊNCIAS

Capitão, R., Conde, J.M.P., 2012. "Implementing the awasys wave absorption system in a peculiar wave flume." Proc 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection – Coastlab12, Ghent, Belgium.

Conde, J.M.P., Reis, R., Fortes, C.J.E.M., Neves, D.R.C.B., 2012. "Wave propagation on a flume: Physical modeling". Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 11, pp. 22-29.

Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Didier, E., Lemos, R., Reis, R., 2013a. "Physical modelling of bichromatic wave propagation and wave breaking in a wave flume". In Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Lisbon, Portugal.

Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Didier, E., Lemos, R., Reis, R., 2013b. "Ensaios experimentais de ondas bicromáticas com e sem rebentação". In Proc. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Bilbao, España.

Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Lemos, R., Reis, R., 2013c. "Ensaios experimentais de ondas irregulares com rebentação". In Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, Portugal.

Endres, L., Neves, D.R.C.B., Didier, E., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T., 2011. "Avaliação do desempenho de modelos numéricos na simulação de ondas ao longo de um canal de ondas". In Proc. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia CMNE2011, Coimbra, Portugal.

Higuera, P., 2015. "Application of Computational Fluid Dynamics to Wave Action on Structures". PhD. Universidade de Cantabria.

Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., 2013. "Realistic wave generation and active wave adsorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®". Coastal Engineering, Vol. 71, pp.102-118.

IHFOAM, 2014. IHFOAM Manual, IHCantabria.

Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J., 2012. "A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®", International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 70, pp. 1073-1088.

Neves, D.R.C.B., Endres, L., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T., 2011. "Physical modelling of wave propagation and wave breaking in a wave channel". In Proc. 5th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Germany.

Neves, D.R.C.B., Endres, L., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T., 2012. "Directional spreading model in a wave channel: Wave propagation and wave breaking". Ocean Engineering, Vol. 55, pp. 148-160.

OpenFOAM, 2013. OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox User Guide. Version 2.2.2.

Okamoto, T., Fortes, C.J.E.M., Basco, D.R., 2010. “Bore Propagation Speed at the Termination of Wave Breaking”. In Proc. 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China.