



Diogo José Seita Afonso

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Simulação numérica da interação de ondas com um quebra-mar poroso utilizando o código OpenFoam

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor José Manuel Paixão Conde,
Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa,
Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Júri:

Presidente: Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil, Prof. Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e
Tecnologia.

Arguente: Doutor Eric Lionel Didier, Bolseiro de Pós-Doutoramento,
Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos
e Estruturas Marítimas, Laboratório Nacional de
Engenharia Civil.

Vogal: Doutor José Manuel Paixão Conde, Prof. Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e
Tecnologia.



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2014

[Simulação numérica da interação de ondas com um quebra-mar poroso utilizando o código OpenFoam]

Copyright © [Diogo José Seita Afonso], Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero agradecer à Universidade Nova de Lisboa, em particular à Faculdade de Ciências e Tecnologia, ao meu orientador Prof. José Conde por toda a atenção e disponibilidade que mostrou, ao Paulo Roberto e todos os colegas de curso.

Aos meus pais, avós e familiares por todo o apoio demonstrado.

À Diana Cunha, e ao meu grupo de amigos que sempre me apoiou.

Resumo

O principal objetivo desta dissertação é explorar o potencial do código *OpenFoam*, no estudo de problemas de engenharia costeira, mais especificamente a interação de ondas com quebra-mares porosos.

Neste sentido, inicialmente é realizada a validação do código numérico *porousInterFoam*, onde é estudada a dependência de malha e de modelos de turbulência. Conclui-se que os resultados numéricos obtidos apresentam uma boa correlação com os experimentais.

Em seguida é feita uma comparação com outros códigos numéricos, nomeadamente o *porousWaveFoam* e o *IHFOAM* onde se verificam resultados idênticos.

Por fim, é realizada uma simulação através do *porousWaveFoam*, da interação de uma onda regular com um quebra-mar poroso, e conclui-se, comparando os resultados obtidos com os resultados dos ensaios experimentais no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que a elevação da superfície livre é bem modelada.

Palavras-chave: Quebra-mar, Meio poroso, *OpenFoam*, *waves2Foam*, *IHFOAM*.

Abstract

The main objective of this dissertation is to explore the potential of *OpenFoam* code, in the study of coastal engineering problems, specifically the interaction of waves with porous breakwaters.

In this sense, the numerical code *porousInterFoam* validation, where the dependency network and turbulence models is being studied is first performed. It is concluded that the numerical results show good agreement with the experimental.

Then a comparison is made with other numerical codes, and in particular *porousWaveFoam IHFOAM* where there are identical results.

Finally, a simulation is performed through *porousWaveFoam*, the interaction of a regular wave with a porous breakwater, and concludes by comparing the results obtained with the results of laboratory tests at the National Civil Engineering Laboratory (LNEC), which the elevation of the free surface is well modeled.

Keywords: Breakwater, Porous media, *OpenFoam*, *waves2Foam*, *IHFOAM*.

Nomenclatura

A	Amplitude de onda
H	Altura de onda
λ	Comprimento de onda
k	Número de onda
T	Período
f	Frequência
ω	Frequência angular
ϕ_p	Potencial Velocidade do escoamento
u	Velocidade da componente horizontal
v	Velocidade da componente vertical
x	Eixo x de referencial cartesiano
y	Eixo y de referencial cartesiano
z	Eixo z de referencial cartesiano
t	Tempo
p	Profundidade
P	Pressão
μ	Viscosidade dinâmica
K	Permeabilidade
v	Velocidade física
ϕ	Porosidade
ρ	Massa volúmica
d_p	Diâmetro dos blocos
X	Vetor posição
μ_{eff}	Viscosidade dinâmica efetiva

p^*	Pressão pseudodinâmica
σ	Tensão superficial
U_c	Velocidade de compressão
α	Fração de fluido
g	Aceleração da gravidade
r	Raio
L	Comprimento
l	Comprimento dos poros
S	Superfície
d	Coefficiente de Darcy
f	Coefficiente de Forchheimer
K_t	Energia cinética turbulenta
n	Nº de elementos
H_s	Altura de onda significativa
T_s	Período de onda significativo

Abreviaturas

<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>VARANS</i>	Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>CFD</i>	Computer Fluids Dynamics
<i>VOF</i>	Volume of fluid
<i>MULES</i>	Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution
<i>Bias</i>	Erro médio
<i>Rmse</i>	Raiz do erro quadrático médio
<i>ZH</i>	Zero hidrográfico

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. <i>Motivação</i>	1
1.2. <i>Objetivos.....</i>	2
1.3. <i>Organização da dissertação</i>	2
CAPÍTULO 2: ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1. <i>Interação ondas/estruturas marítimas</i>	5
2.2. <i>Teoria linear de ondas</i>	5
2.3. <i>Meio Poroso.....</i>	7
2.4. <i>Lei de Darcy</i>	8
2.5. <i>Equações VARANS</i>	9
CAPÍTULO 3: CÓDIGO NUMÉRICO	11
3.1. <i>Código OpenFoam.....</i>	11
3.2. <i>Bibliotecas OpenFoam utilizadas</i>	11
3.3. <i>Modelos de turbulência</i>	15
CAPÍTULO 4: VALIDAÇÃO CÓDIGO NUMÉRICO POROUSINTERFOAM	17
4.1. <i>Descrição experimental</i>	18
4.2. <i>Descrição numérica</i>	18
4.3. <i>Dependência da malha</i>	20
4.4. <i>Dependência dos modelos de turbulência.....</i>	25
4.5. <i>Validação dos resultados numéricos.....</i>	28
4.6. <i>Comparação entre o código numérico PorousWaveFoam e IHFOAM ..</i>	31
CAPÍTULO 5: SIMULAÇÃO DO MODELO DO QUEBRA-MAR POROSO DE ALBUFEIRA	35
5.1. <i>Modelo Físico</i>	35
5.2. <i>Geometria</i>	37
5.3. <i>Modelo Numérico.....</i>	38
5.4. <i>Resultados obtidos.....</i>	39
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	46
6.1. <i>Conclusões.....</i>	46

6.2. <i>Trabalho futuro</i>	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS QUE REPRESENTAM A ONDA [3].	6
FIGURA 2: DEFINIÇÃO DE MÉDIAS DE VOLUME E ESCALAS DE COMPRIMENTO [10].	13
FIGURA 3: FASE INICIAL DO MODELO, ADAPTADO [7].....	17
FIGURA 4: CONDIÇÃO FRONTEIRA	19
FIGURA 5: DISCRETIZAÇÕES DE CADA MALHA: A) MALHA 1; B) MALHA 2; C) MALHA 3.	20
FIGURA 6: RESULTADOS OBTIDOS PARA O INSTANTE DE TEMPO $T=0,2s$: A) MALHA 1; B) MALHA 2; C) MALHA 3.....	21
FIGURA 7: RESULTADOS OBTIDOS PARA O INSTANTE DE TEMPO $T=0,4s$: A) MALHA 1; B) MALHA 2; C) MALHA 3.....	22
FIGURA 8: RESÍDUOS DE PRESSÃO PARA CADA SIMULAÇÃO: A) MALHA 1; B) MALHA 2; C)MALHA 3.....	24
FIGURA 9: DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTE, K_T , [m^2/s^2] RECORRENDO AO PROGRAMA IHFOAM [7]: A) $T=0,4s$; B) $T=1s$; C) $T=2s$	26
FIGURA 10: RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA: A) K-E; B) K- Ω ; C) SEM TURBULÊNCIA.	27
FIGURA 11: COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS (LINHA) E EXPERIMENTAIS [7] [17] (PONTOS) PARA A 1ª SIMULAÇÃO: A) $T=0 s$; B) $T=0,4 s$; C) $T=0,8 s$ D) $T=1,2 s$; E) $T=1,6 s$	29
FIGURA 12: COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS (LINHA) E EXPERIMENTAIS [7] [17] (PONTO) PARA A 2ª SIMULAÇÃO: A) $T=0 s$; B) $T=0,35 s$; C) $T=0,75 s$ D) $T=1,15 s$; E) $T=1,55 s$	30
FIGURA 13: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS POROUSINTERFOAM (ESQUERDA) VS POROUSWAVEFOAM (MEIO) VS IHFOAM (DIREITA): A) $T=0,2 s$; B) $T=0,4 s$; C) $T=0,6 s$	32
FIGURA 14: PERFIL DO CANAL DE ONDAS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS (ESCALA 1:30) [1].	35
FIGURA 15: SECÇÃO DO QUEBRA-MAR, PROTÓTIPO À ESCALA 1:30 [18] [19].....	36
FIGURA 16: MODELO EXPERIMENTAL COM INDICAÇÃO DAS SONDAS [19].....	37

FIGURA 17: MALHA GERADA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA: A) DOMÍNIO COMPLETO; B) AMPLIADO NA ZONA DO QUEBRA-MAR.	38
FIGURA 18: INTERAÇÃO DE ONDA COM ESTRUTURA POROSA: A) MODELO EXPERIMENTAL; B) MODELO NUMÉRICO.....	39
FIGURA 19: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE NA SONDA G2 SEM A PRESENÇA DO QUEBRA-MAR.	40
FIGURA 20: ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS.....	42
FIGURA 21: ALTURA SIGNIFICATIVA E PERÍODO SIGNIFICATIVO AO LONGO DO CANAL	44

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS	18
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS	20
TABELA 3: POSIÇÃO DAS SONDAS AO LONGO DO CANAL	37
TABELA 4: DADOS ESTATÍSTICOS PARA A SONDA G2	41

Capítulo 1: Introdução

1.1. Motivação

Portugal é um país com uma longa faixa costeira, sendo que esta é constantemente ameaçada pelo clima de agitação marítima e erosão, sendo frequentes situações de emergência que têm consequências graves a nível económico e ambiental. Como tal, existe a necessidade de encontrar estruturas marítimas que permitam garantir a segurança destas zonas, especialmente no que respeita à sua estabilidade e galgamento, possibilitando assim, uma utilização sustentável da atividade portuária.

Atualmente existem diversas soluções de estruturas marítimas porosas, tais como quebra-mares que, como o nome indica, servem para reduzir a energia das ondas na zona por eles protegida. A energia das ondas é reduzida pela combinação entre a reflexão e dissipação das ondas nos quebra-mares, reduzindo assim parte da energia transmitida para a zona abrigada. Desta forma, a principal função de um quebra-mar é criar zonas de acalmia no acesso e no interior dos portos.

Neste sentido, um conhecimento pormenorizado do escoamento através de meios porosos nos quebra-mares permite otimizar o desempenho hidráulico da estrutura, tendo sido este o principal fator que motivou esta dissertação, pois existem poucas formulações e validações em escoamento em meio poroso.

Como tal, nesta dissertação é estudada a interação de ondas com quebra-mares porosos, com o objetivo de observar os efeitos de reflexão e dissipação, através do uso do programa *OpenFoam*.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal validar o código numérico do *OpenFoam* para o estudo de escoamento em meio poroso.

Neste sentido, pretende-se, numa primeira fase, validar o *solver PorousInterFoam* através da comparação entre resultados numéricos e experimentais; e posteriormente, simular através do *PorousWaveFoam* a interação entre uma onda regular e um quebra-mar poroso, seguido de uma análise entre os resultados numéricos obtidos e os resultados experimentais obtidos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos principais: o primeiro capítulo é referente à motivação do tema da tese e os principais objetivos da mesma; seguidamente surge o segundo capítulo onde é apresentado um enquadramento teórico acerca da teoria das ondas lineares, Lei de Darcy aplicado ao meio poroso e as equações *VARANS*; posteriormente, no terceiro capítulo, é abordado o funcionamento e as diversas aplicações do código numérico *OpenFoam* utilizado na dissertação; no quarto capítulo é feita a validação do código numérico *PorousInterFoam*, bem como uma comparação entre outros códigos numéricos derivados do *OpenFoam*, *PorousWaveFoam* e *IHFOAM*; no quinto capítulo é apresentado um exemplo prático do quebra-mar de Albufeira, cujos ensaios experimentais foram realizados no LNEC, e é feita a simulação numérica recorrendo ao código *PorousWaveFoam*; e por fim, no sexto

capítulo são resumidos as conclusões obtidas e realizada uma análise dos mesmos.

Capítulo 2: Enquadramento teórico

2.1. Interação ondas/estruturas marítimas

A agitação marítima assume um papel de grande relevância nas zonas costeiras, sendo deste modo necessário saber avaliar e prever as condições do estado do mar de uma forma correta, considerando que as características das ondas se modificam à medida que se aproximam da costa [1].

A interação de ondas com estruturas costeiras é um problema complexo. A maior parte das estruturas não estão totalmente submersas e existe naturalmente o impacto da onda com a estrutura, o que provoca danos se os impactos forem violentos. Se a estrutura for mal dimensionada pode ainda ocorrer galgamento sobre a mesma.

Os códigos numéricos de mecânica dos fluidos computacional, *CFD* (*Computer Fluid Dynamics*) estão em constante desenvolvimento para este tipo de aplicações, tendo uma vasta gama de opções e de flexibilidade para se adaptarem aos problemas mais complexos de engenharia costeira.

2.2. Teoria linear de ondas

A teoria linear de ondas usada no capítulo 5 é a teoria *Stokes I*, desenvolvida por Airy [2]. Neste subcapítulo é feita uma revisão sobre a teoria linear de ondas.

As ondas podem ser caracterizadas usando algumas propriedades básicas:

- A altura de onda, H ou a amplitude, $A = \frac{H}{2}$.
- O comprimento de onda, λ , ou o *nº de onda*, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.
- O período de onda, T , a frequência, $f = T^{-1}$, ou a frequência angular, $\omega = 2\pi f$.

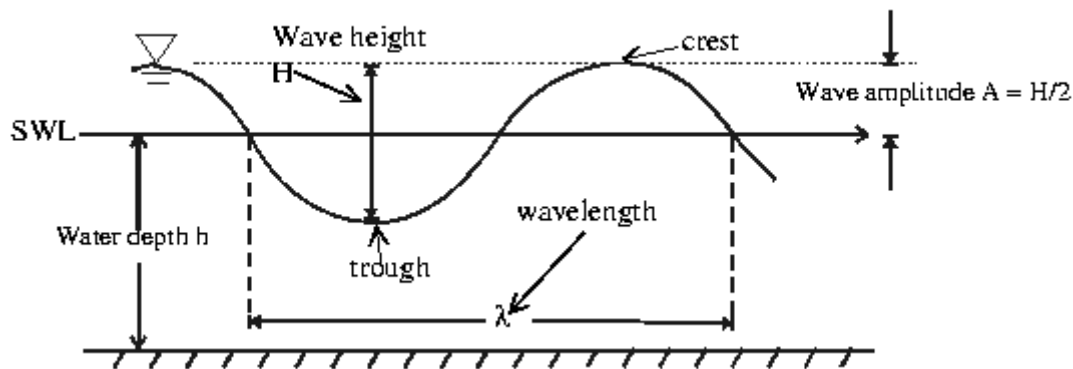


Figura 1: Representação dos parâmetros que representam a onda [3].

Para recorrer à teoria linear de ondas, ou teoria das ondas de pequena amplitude, em que a agitação marítima é descrita como a sobreposição de diversas sinusoides (no caso de agitação regular é descrita apenas por uma senoide), é necessário fazer várias simplificações no estudo da elevação da superfície do mar, uma vez que as ondas possuem formas e características diversas. Estas simplificações dizem respeito tanto às próprias ondas como ao meio em que se propagam:

- O fluido é homogêneo e incompressível, pelo que a massa volúmica é constante.
- A tensão superficial é desprezável.
- O efeito coriolis devido à rotação da Terra também é desprezado.
- A pressão na superfície livre é uniforme e constante.
- O fluido é invíscido.
- O escoamento é irrotacional.
- O fundo é uma fronteira horizontal, fixa e impermeável.
- A amplitude de onda é pequena e a forma da onda é invariante no tempo e no espaço.

Tendo em conta as simplificações mencionadas, a solução de problemas relativa à teoria linear de ondas recorre à solução da equação de Laplace que permite definir o potencial de velocidade do escoamento, $\phi_p(x, y, t)$.

Considerando um escoamento bidimensional que varia no tempo e considerando válida a teoria linear, o potencial $\phi_p(x, y, t)$ pode ser descrito como [1]:

$$\phi_p(x, y, t) = -\frac{H g \cdot \cosh(k(y+p))}{2 \omega \cdot \cosh(kp)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Derivando a equação (2.1) em ordem às variáveis x e y , é possível obter as componentes horizontal e vertical da velocidade, u e w , das partículas do fluido.

As componentes da velocidade são dadas por [1]:

$$u(x, y, t) = \frac{H k \cdot g \cdot \cosh(k(y+p))}{2 \omega \cdot \cosh(kp)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

$$w(x, y, t) = \frac{H k \cdot g \cdot \sinh(k(y+p))}{2 \omega \cdot \cosh(kp)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

2.3. Meio Poroso

As estruturas costeiras tendem a ser feitas de materiais porosos, isto porque dissipam a maior parte da energia das ondas, resultando em pequenos galgamentos sobre as estruturas, e em termos financeiros, têm custos mais baixos. [4]

A modelação do meio poroso pode ser feita através de duas aproximações possíveis, nomeadamente através da modelação explícita dos blocos e espaços vazios ou através das equações *Darcy-Forchheimer* para meio poroso [4].

Modelar diretamente é ocasionalmente possível em casos onde os blocos e os espaços vazios entre eles são aproximadamente retangulares, o que na realidade não se verifica. Esta aproximação permite dar uma resposta mais exata, contudo em termos práticos é difícil aplicar aos modelos *CFD*, uma vez que é necessário definir malhas bastante complexas.

As equações *Darcy-Forchheimer* são usadas em engenharia geotécnica para modelar o escoamento através dos solos, contudo também são válidas para casos com materiais porosos. Assumem algumas suposições como escoamento

estacionário e irrotacional. Estas equações podem ser usadas para estudar a interação de ondas com quebra-mares porosos.

2.4. Lei de Darcy

Henry Darcy (1901) obteve a partir de dados experimentais a relação entre a velocidade do fluido (u) e a queda de pressão (Δp) para um escoamento em regime estacionário, incompressível e unidirecional, ficando conhecida como a *lei de Darcy* [5]:

$$-\nabla P = \left(\frac{\mu}{K}\right) \times u \quad (2.4)$$

Sendo K a permeabilidade do meio [m^2], e u [m/s] a velocidade de *Darcy* ou velocidade superficial que representa a velocidade do fluido fora da região porosa. Esta lei mostra uma dependência linear entre a queda de pressão e a velocidade. A velocidade superficial relaciona-se com a velocidade física (intersticial), v , através da porosidade (ϕ) da seguinte forma:

$$u = \phi v \quad (2.5)$$

No entanto, diversos investigadores observaram que para velocidades elevadas, esta lei se afastava do comportamento linear de *Darcy* e que era necessário incorporar um termo inercial. Neste contexto, surgiram diferentes modificações a esta lei, sendo a *lei de Forchheimer*, a mais aceite pela comunidade científica dada pela seguinte equação:

$$-\nabla P = \left(\frac{\mu}{K}\right) u + \rho\beta|u|u \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{B(1-\phi)}{d_p\phi^3} \quad (2.7)$$

Onde d_p é o diâmetro dos blocos e B uma constante que normalmente toma o valor 1,75 [6]. Deste modo, esta lei incorpora o termo inercial e corrige a

lei de Darcy para escoamentos com velocidade elevada, onde a inércia prevalece sobre os efeitos viscosos.

2.5. Equações *VARANS*

As equações *VARANS* (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) foram resolvidas [7] para caracterizar a interação de ondas com estruturas porosas, com resultados satisfatórios para problemas 2D.

As equações *VARANS* são obtidas para uma média de volume das equações *RANS*.

Devido à enorme complexidade do escoamento em meio poroso temos de assumir algumas condições:

- As propriedades de meio poroso são independentes do tempo.
- O escoamento dentro e fora do meio poroso pode ser modelado pelas mesmas equações.
- Consideramos fluido incompressível.

Para consultar o modelo de equações completo, consultar a referência [7].

Capítulo 3: Código numérico

3.1. Código *OpenFoam*

O *OpenFoam* (*Open Field Operation and Manipulation*) é um programa de mecânica dos fluidos computacional, sendo que é livre e aberto para utilizadores do sistema operativo Linux [8].

Este programa consiste numa compilação de bibliotecas que operam em C++ que permitem resolver problemas complexos como turbulência, escoamento de fluidos, eletromagnetismo, reações químicas, combustão, entre outros.

Inclui diversas aplicações de pré e pós-processamento incluindo a geração de malha, o código *blockMesh*.

Ao contrário de outros códigos comerciais, o *OpenFoam* não é uma caixa preta, como tal, o utilizador pode controlar e modificar cada um dos passos do processo alterando assim o código.

O pós-processamento pode ser feito na linha de comando ou recorrendo a programas de interface gráfica, por exemplo o *Paraview* ou *Tecplot 360*.

O *OpenFoam* está preparado para correr casos em paralelo, decompondo assim o domínio de cálculo.

Para as simulações realizadas foi utilizado o *OpenFoam* 2.2.1 que correu no sistema operativo *ubuntu* 12.04 LTS, num computador com um processador de 2,5 GHz.

3.2. Bibliotecas *OpenFoam* utilizadas

Em seguida são apresentados os códigos numéricos e as bibliotecas usadas nas simulações do capítulo 4 e capítulo 5.

3.2.1. *InterFoam* solver

O *interFoam* resolve as equações *RANS* (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) para duas fases usando uma discretização de volumes finitos e o método *VOF* (Volume of fluid).

No método *VOF* cada fase é descrita pela fração α_i ocupada pelo volume de fluido. A principal vantagem é que se trata de um método simples permitindo configurações de superfície livre complexas e que não envolve movimento de malha [9].

As equações a resolver incluem a equação da continuidade (3.1), conservação de quantidade de movimento (3.2) e fração de volume (3.3), são:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{X} \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma_k \nabla \alpha_1 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha_1 + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha_1 (1 - \alpha_1) = 0 \quad (3.3)$$

Onde $\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_{turb}$ é a viscosidade dinâmica efetiva, p^* é a pressão pseudodinâmica, \mathbf{X} é vetor posição, σ tensão superficial, \mathbf{g} é a aceleração da gravidade e \mathbf{U}_c velocidade de compressão [9].

Como a pressão e a velocidade são acopladas, a solução dos dois campos é obtida por uma aproximação a dois passos. O *OpenFoam* utiliza uma metodologia designada *PIMPLE* que foi originada pela combinação dos algoritmos *PISO* e *SIMPLE*.

A solução da eq (3.3) é delimitada entre 0 e 1, onde 0 representa ar e 1 representa líquido. O *OpenFoam* possui um solver denominado *MULES* (multidimensional universal limiter for explicit solution) que utiliza um fator limitante nos fluxos para o termo de divergência designado para cumprir essas restrições.

3.2.2. *PorousInterFoam* solver

O *PorousInterFoam* permite resolver as equações VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes).

O meio poroso é definido como ilustra a figura 2. S é a superfície criada para uma média de volume que pode incluir o meio poroso ou o meio líquido. No exemplo a superfície S é definida por um círculo de raio r_0 , o comprimento da escala macroscópica L e o comprimento dos poros l estão definidos na figura.

A média de volume é aplicada com a restrição $l \ll r_0 \ll L$.

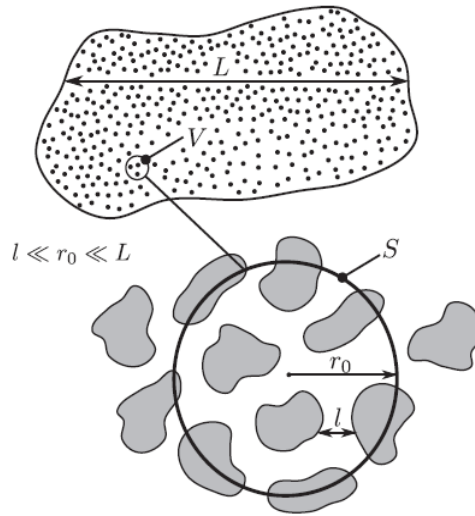


Figura 2: Definição de médias de volume e escalas de comprimento [10].

No *OpenFoam* a permeabilidade da área porosa é representada por um termo adicional na equação quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} = [\text{termos usuais N. Stokes}] + S \quad (3.4)$$

$$S = (\mu \cdot \bar{\bar{d}} + \bar{\bar{f}} \cdot \frac{1}{2} \rho |U|) \quad (3.5)$$

Onde os tensores d [m^{-2}] e f [m^{-1}] são respetivamente o coeficiente de *Darcy* e o coeficiente de *Forchheimer* e são conhecidos como parâmetros de porosidade.

No caso de um meio poroso totalmente homogéneo, os parâmetros de porosidade podem ser representados pelos escalares d e f . É assim possível relacionar à equação de *Darcy-Forchheimer* (eq 2.6) da seguinte forma:

$$d = \frac{1}{K} \quad (3.6)$$

$$f = 2\beta \quad (3.7)$$

3.2.3. *Waves2Foam*

O *waves2Foam* é um *solver* numérico baseado num outro *solver* do *OpenFoam* - o *interFoam* - que utiliza as equações *RANS* para dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, acoplado ao método *VOF* para resolver problemas de escoamentos de fluidos bifásicos separados por uma superfície livre [11].

O *interFoam* utiliza ainda um método que tem o intuito de manter os limites da fração da fase independentes dos esquemas numéricos subjacentes, esse método é denominado de método *MULES* (Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution).

Além das características que definem o *interFoam*, o *waves2Foam* inclui ainda uma técnica de zonas de relaxamento, que inclui uma zona de geração de ondas e outra de dissipação, para que as ondas refletidas pelas fronteiras do domínio ou por efeito numérico não tenham efeitos de contaminação dos resultados. Além das zonas de relaxamento, possui ainda uma grande gama de teoria de ondas disponível para cada caso específico, sendo que ainda podem ser adicionadas novas teorias, desde que as equações estejam presentes no código.

A livreria *Waves2Foam* inclui ainda um conjunto de ferramentas de pré-processamento para a definição da teoria de onda a utilizar, das condições fronteiras e iniciais, zonas de relaxamento e parâmetros da onda a ser gerada conforme a teoria de onda selecionada. Possui também ferramentas de pós-processamento para análise de resultados obtidos, que permite criar um ficheiro de sondas de superfície livre e distribuí-las ao longo do domínio para registar a evolução da superfície livre em função do tempo.

Recentemente (Dezembro 2013) foi criado um código numérico na biblioteca do *waves2Foam*, denominado *porousWaveFoam*. O código permite resolver as equações *VARANS* e simultaneamente recorrer à geração de ondas, o que permite recorrer ao código para resolver problemas de engenharia costeira mais realísticos.

3.2.4. IHFOAM

IHFOAM é um código numérico que permite resolver as equações *RANS* para problemas a três dimensões. À semelhança do *waves2Foam*, o código é baseado no método *VOF*. O código suporta modelos de turbulência e tem a capacidade de gerar ondas de acordo com várias teorias de ondas [12].

A absorção de ondas é programada baseando-se na teoria a duas dimensões, que permite uma saída de ondas com menor reflexão, quer em condições de fronteira absorventes quer em condições de geração de ondas.

3.3. Modelos de turbulência

Os modelos de turbulência usados nesta dissertação são:

- $K - \varepsilon$
- $K - \omega$

Para examinar detalhadamente o modelo de equações, consultar a referência [13] para o modelo de turbulência $K - \varepsilon$ e [14] para o modelo $K - \omega$.

Capítulo 4: Validação código numérico

PorousInterFoam

Numa primeira fase, é estudada a dependência da malha, a dependência do modelo de turbulência e é feita a validação com um caso experimental. Posteriormente é realizada uma comparação com os códigos numéricos *wavePorousFoam* e *IHFOAM*.

O código é validado com um caso de referência experimental [15], onde uma coluna de água, confinada por uma porta móvel, é libertada do repouso interagindo com meio poroso, como se pode observar na figura 3.

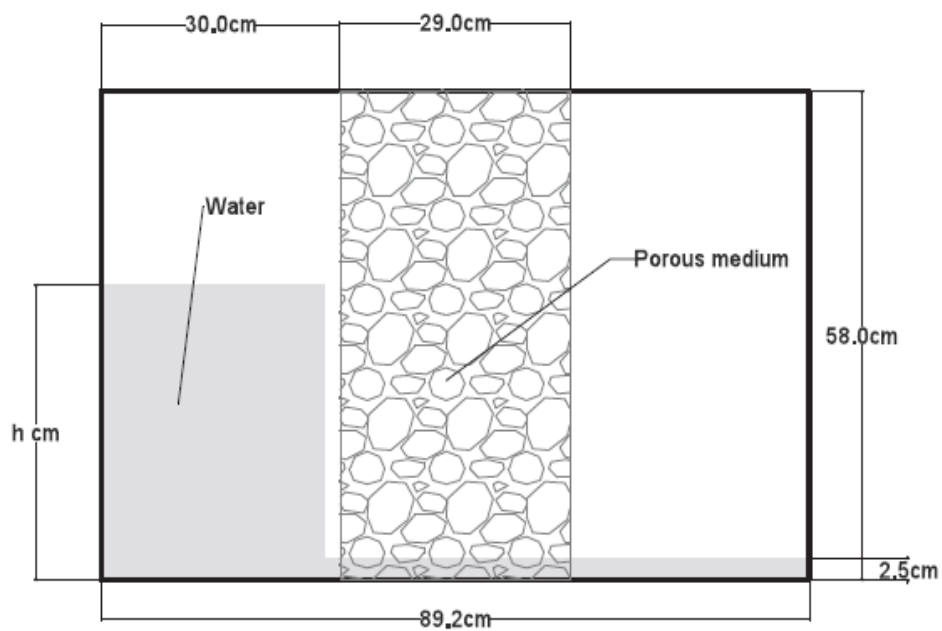


Figura 3: Fase inicial do modelo, adaptado [7].

4.1. Descrição experimental

As experiências foram realizadas num tanque de vidro que permite capturar a elevação da superfície livre ao longo do domínio, considerado um caso bidimensional.

O tanque tem um comprimento de 89,2 cm, 58 cm de altura e o meio poroso situado no meio do tanque ocupa um comprimento de 29 cm [15].

Realizaram-se diversas experiências alterando a altura de queda de água e a porosidade relativa, como tal, para as simulações a realizar foi considerada uma altura de 25 cm e 35 cm, o meio poroso foi simulado com pedras de diâmetro nominal (d_p) de 1,59 cm e 3 mm. A porosidade relativa (ϕ) é respetivamente de 0,49 e 0,39.

4.2. Descrição numérica

O tanque foi reproduzido conforme o caso experimental da figura 4.

Na tabela 1 encontram-se as características dos fluidos usados nas simulações:

Tabela 1: Características dos fluidos.

	Ar	Água
Viscosidade cinemática (m^2/s)	$1,48 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-6}$
Massa volúmica (Kg/m^3)	1,2	10^3

Com condição fronteira foram impostas: a condição de escorregamento para a velocidade nas paredes laterais e no fundo do domínio e a condição de gradiente nulo para a pressão. O topo do domínio é considerado aberto para o exterior, a velocidade é calculada de acordo com o fluxo normal à fronteira. O campo de pressão é hidrostático e a velocidade é inicialmente nula. O meio poroso é simulado de acordo com a equação de *Darcy-Forchheimer*.

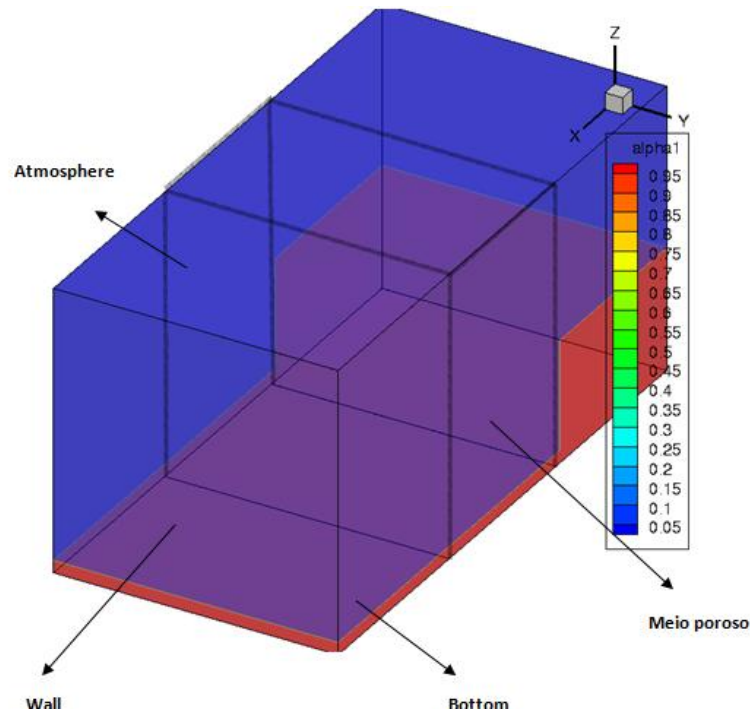


Figura 4: Condição fronteira

A malha é feita por blocos recorrendo ao *blockMesh*, onde foram simulados casos com diferentes discretizações com o objetivo de avaliar a influência da dimensão dos elementos nos resultados.

A implementação do meio poroso no código numérico é feita através de dois parâmetros que relacionam a porosidade (ϕ), permeabilidade (K) e o diâmetro dos blocos (d_p) [6].

$$K = \frac{d_p^2 \phi^3}{A(1-\phi)^2} \quad (4.1)$$

Onde A é a constante de *Ergun* e é igual a 150.

Os parâmetros d e f , são definidos pelas equações (3.6), (3.7) e (2.7), permitem caracterizar o meio poroso.

Para a primeira simulação considerou-se $\phi = 0,49$ e $d_p = 1,59 \text{ cm}$ e obteve-se $d = 1,3 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$ e $f = 954,23 \text{ m}^{-1}$.

Para a segunda simulação considerou-se $\phi = 0,39$ e $d_p = 3 \text{ mm}$ e obteve-se $d = 1,1 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$ e $f = 17687,1 \text{ m}^{-1}$.

4.3. Dependência da malha

As simulações foram realizadas tendo em conta 3 níveis de discretização para a malha. Na tabela 2 encontram-se descritas as características de cada malha:

Tabela 2: Características das malhas

	Elementos cúbicos	Passo de tempo (s)	Courant máx	Tempo de processamento
Malha 1	2 400	0,05	0,2	20 min
Malha 2	22 500	0,05	0,206	2h
Malha 3	93 750	0,05	0,21	8h

As malhas 1 e 2 são uniformemente distribuídas, enquanto que a 3ª malha foi especialmente refinada na zona de interação entre o fluido e o meio poroso.

Na figura 5 é possível verificar as discretizações das malhas usadas na simulação. Na figura não está representado o domínio completo, apenas 30 cm x 30 cm do domínio.

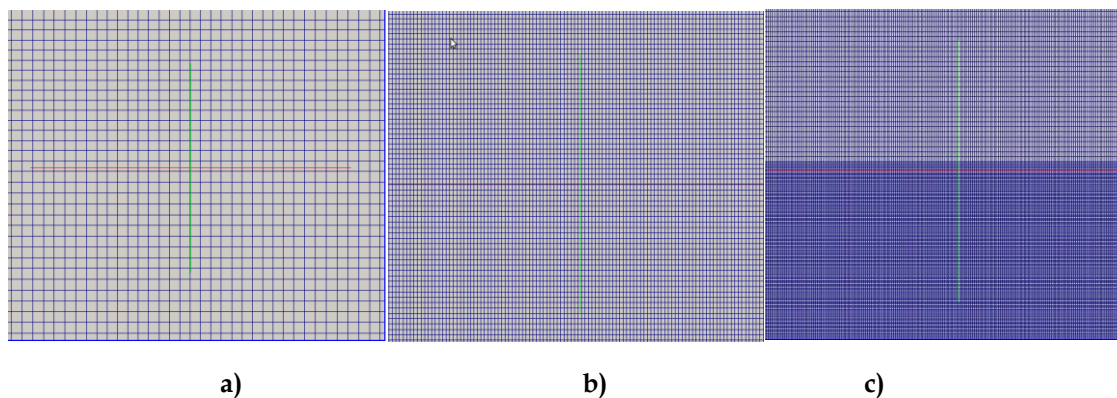


Figura 5: Discretizações de cada malha: a) Malha 1; b) Malha 2; c) Malha 3.

Os resultados foram simulados com o algoritmo *PIMPLE*, com o modelo de turbulência $K - \epsilon$.

As simulações efetuadas mantiveram todos os parâmetros constantes, exceto o refinamento de cada uma das malhas.

Na figura 6 e 7 estão representados os resultados da elevação da superfície livre para as diferentes malhas em diferentes intervalos de tempo.

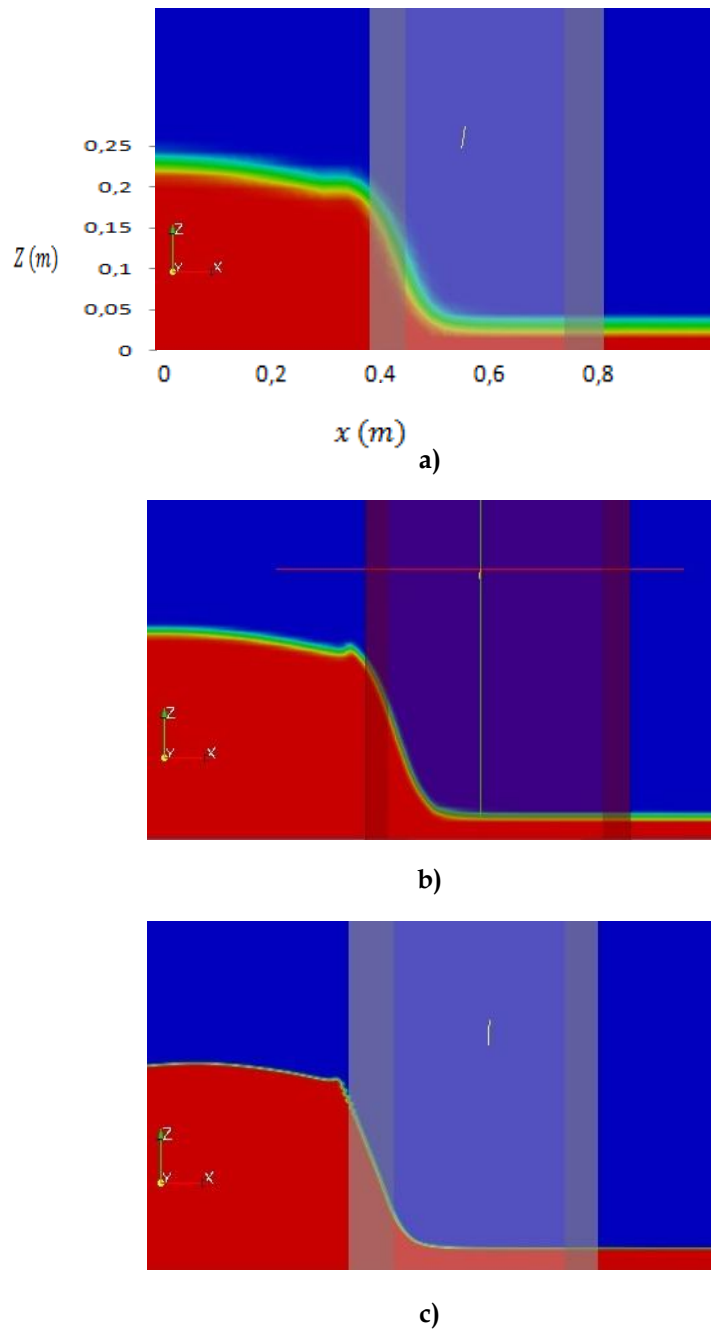


Figura 6: Resultados obtidos para o instante de tempo $t=0,2s$: a) Malha 1; b) Malha 2; c) Malha 3.

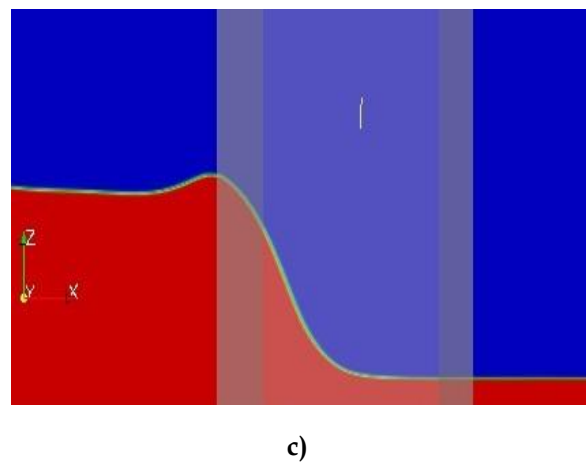
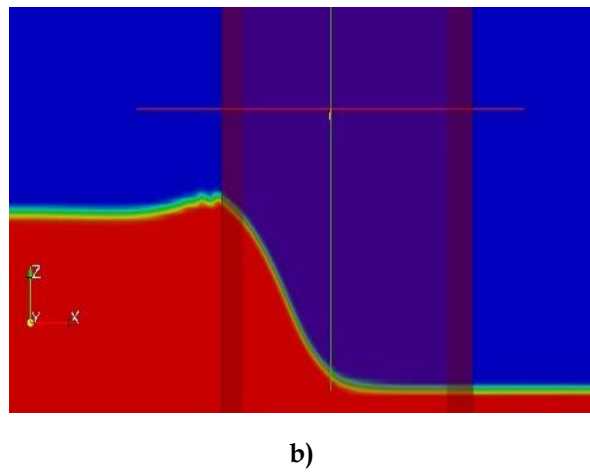
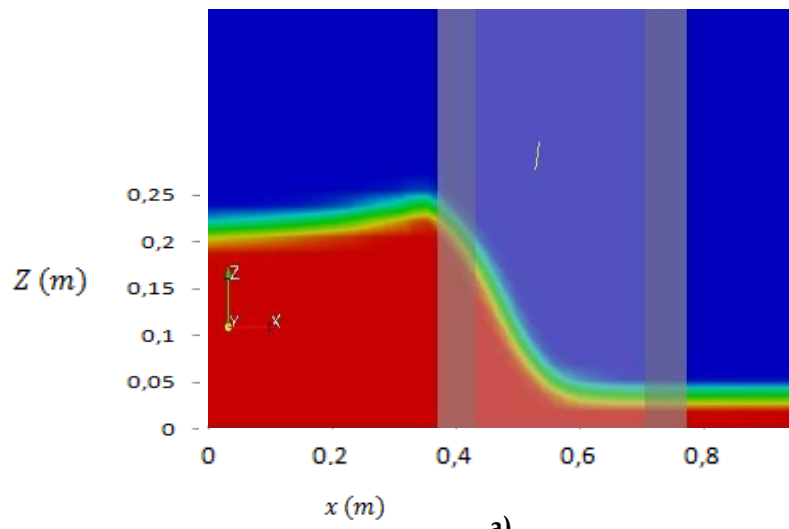


Figura 7: Resultados obtidos para o instante de tempo $t=0,4s$: a) Malha 1; b) Malha 2; c) Malha 3.

A malha 1 retrata uma malha muito pouco densa, o que levou a obter resultados menos precisos em comparação com as outras 2 malhas.

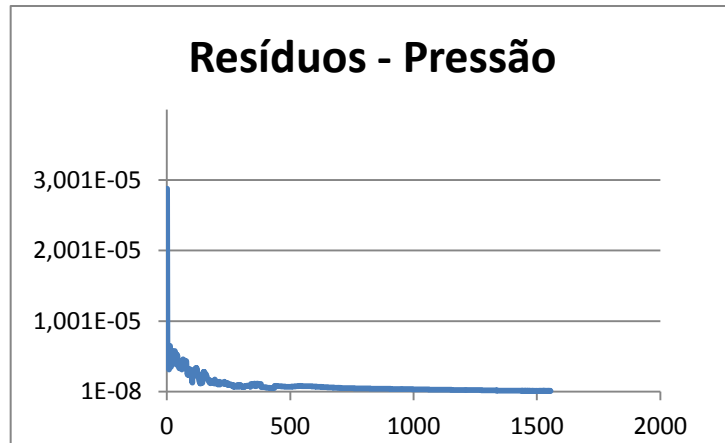
A malha 2 apresenta uma boa modelação do problema, contudo apresenta descontinuidades na interface água/ar.

O refinamento da malha junto à interação de água com o meio poroso feito na malha 3 é importante pelo facto de ser uma zona de fortes gradientes. Para ter uma noção da convergência da solução, foram calculados os resíduos para cada simulação.

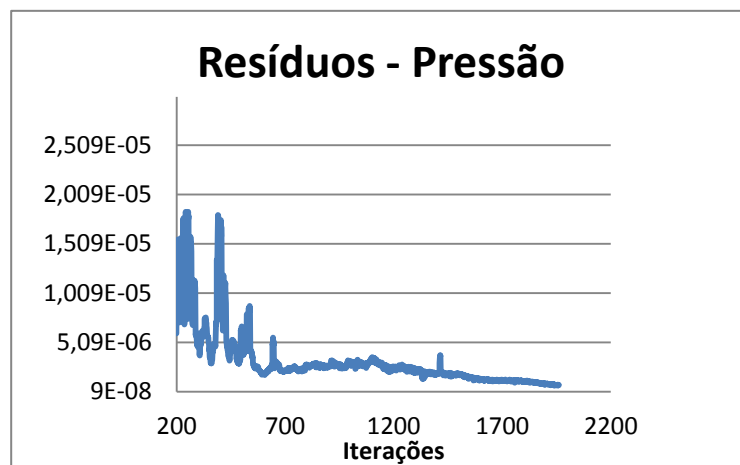
Existem três tipos de contribuições para o erro de uma solução numérica em mecânica dos fluidos computacionais: o erro de arredondamento, o erro iterativo e o erro de discretização.

O erro de arredondamento é devido à precisão finita dos computadores e tende a aumentar com o refinamento da malha; o erro iterativo é devido ao carácter não linear do sistema de equações resolvidas [16]. No decurso da resolução do algoritmo iterativo, o fecho do balanço em cada volume de controlo é um valor pequeno, não nulo, que em circunstâncias normais, diminui com a progressão da solução [5]. Este valor é denominado resíduo.

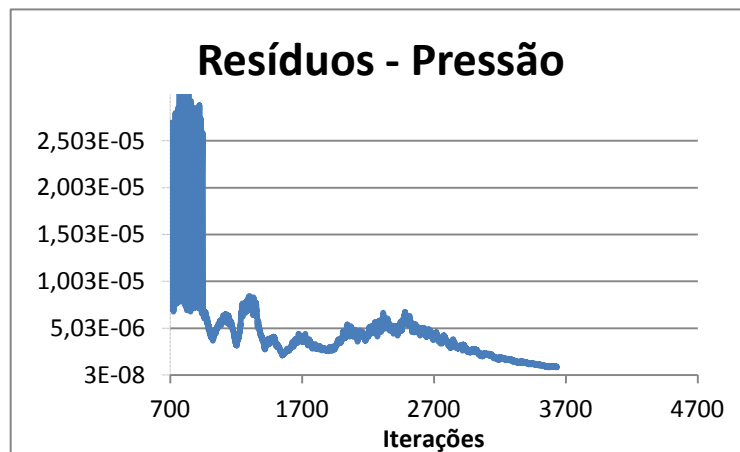
Na figura 8 apresentam-se os resultados dos resíduos adimensionalizados para cada uma das malhas:



a)



b)



c)

Figura 8: Resíduos de pressão para cada simulação: a) Malha 1; b) Malha 2; c) Malha 3.

Os resíduos da malha 1 mostram que a partir de poucas iterações os resultados dos resíduos convergem para valores na ordem dos 10^{-7} .

A 2ª e 3ª malha mostram uma convergência mais demorada, que se deve ao facto das malhas terem um maior número de elementos. Os valores dos resíduos mostram que da malha 2 para a malha 3 não se obteve uma grande melhoria da solução, uma vez que ambos os resultados convergem para valores na ordem dos 10^{-8} .

Através dos resultados pode-se concluir que uma malha mais refinada não iria contribuir muito para a precisão da solução final.

Não existe uma regra universal que permita avaliar a convergência de uma solução numérica [5]. Embora a diminuição de resíduos seja um bom método para controlar a evolução da solução numérica, não é, no entanto, o único indicador de convergência. Por exemplo a utilização de esquemas de ordem superior, utilização de fatores de relaxação muito elevados e uma baixa qualidade da discretização da malha podem influenciar a convergência da solução.

De seguida, é apresentado um estudo da influência do modelo de turbulência que permite identificar qual o modelo que se adapta melhor ao caso em estudo.

4.4. Dependência dos modelos de turbulência

Neste subcapítulo é analisado um caso de estudo realizado por Lara *et al* [7][17] com o intuito de perceber onde os efeitos turbulentos se fazem sentir com maior intensidade, e posteriormente são apresentados os resultados das simulações para os modelos de turbulência: $K - \varepsilon$, $K - \omega$ e sem modelo de turbulência.

O estudo realizado por Lara *et al* [7], como é possível verificar na figura 9, demonstra que os efeitos turbulentos são gerados a partir do instante em que a porta é aberta e o escoamento acelera. Como tal, uma velocidade de escoamento elevada dentro do meio poroso gera maiores efeitos de turbulência. A partir do instante em que o escoamento interage com a estrutura porosa e passa a desenvolver-se lentamente, deixa-se de ter praticamente os efeitos turbulentos.

É importante referir que o meio poroso pode induzir ou dissipar turbulência dependendo do regime hidráulico forçado pelo escoamento. É observado na figura 9 que os valores mais elevados da energia cinética turbulenta são registados junto à superfície livre, onde são também verificadas velocidades mais elevadas.

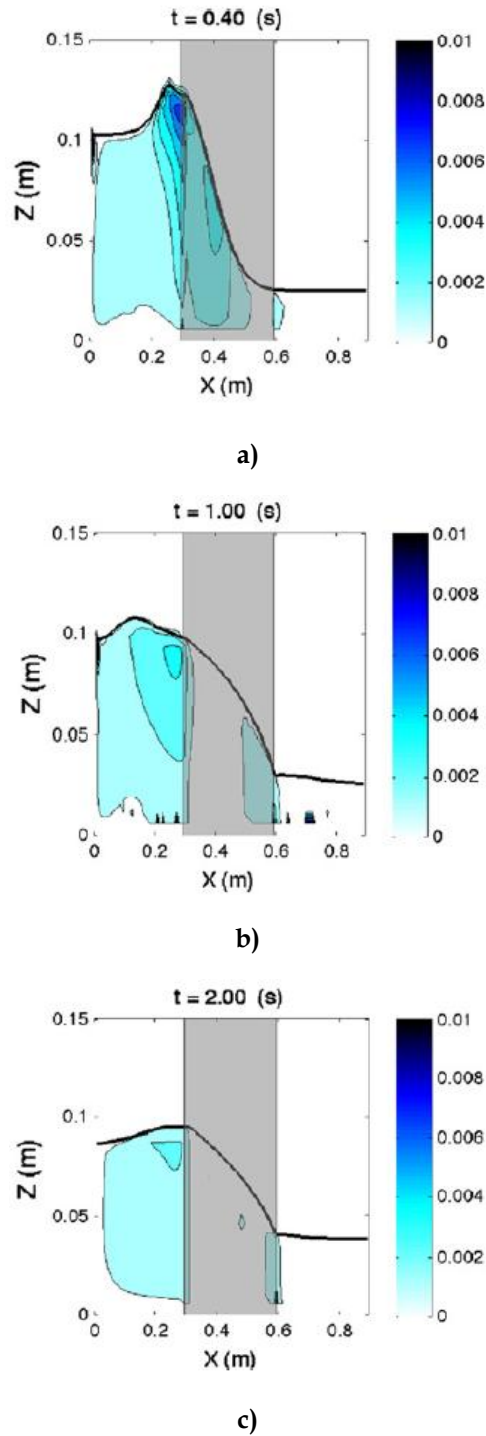


Figura 9: Distribuição da energia cinética turbulenta, Kt , [m^2/s^2] recorrendo ao programa IHFoam [7]: a) $t=0,4s$; b) $t=1s$; c) $t=2s$.

Para o instante $t=0,4s$, momentos após a interação da coluna de água com o meio poroso, verificam-se valores de energia cinética turbulenta na ordem dos $0,01 \text{ m}^2/s^2$. Os instantes seguintes mostram níveis pouco significativos de turbulência como era expectável.

Os estudos realizados neste capítulo 4, nomeadamente na dependência da malha, foram simulados com o modelo de turbulência $K - \varepsilon$. No decorrer deste capítulo observamos que os resultados mostram uma boa adaptação do modelo desde o início ao fim da simulação.

Com o intuito de analisar o modelo que melhor se adapta ao caso, foram feitas simulações para 2 modelos de turbulência e sem turbulência. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 10, para os instantes de tempo $t=0,2 \text{ s}$; $t=0,4 \text{ s}$ e $t=0,6 \text{ s}$.

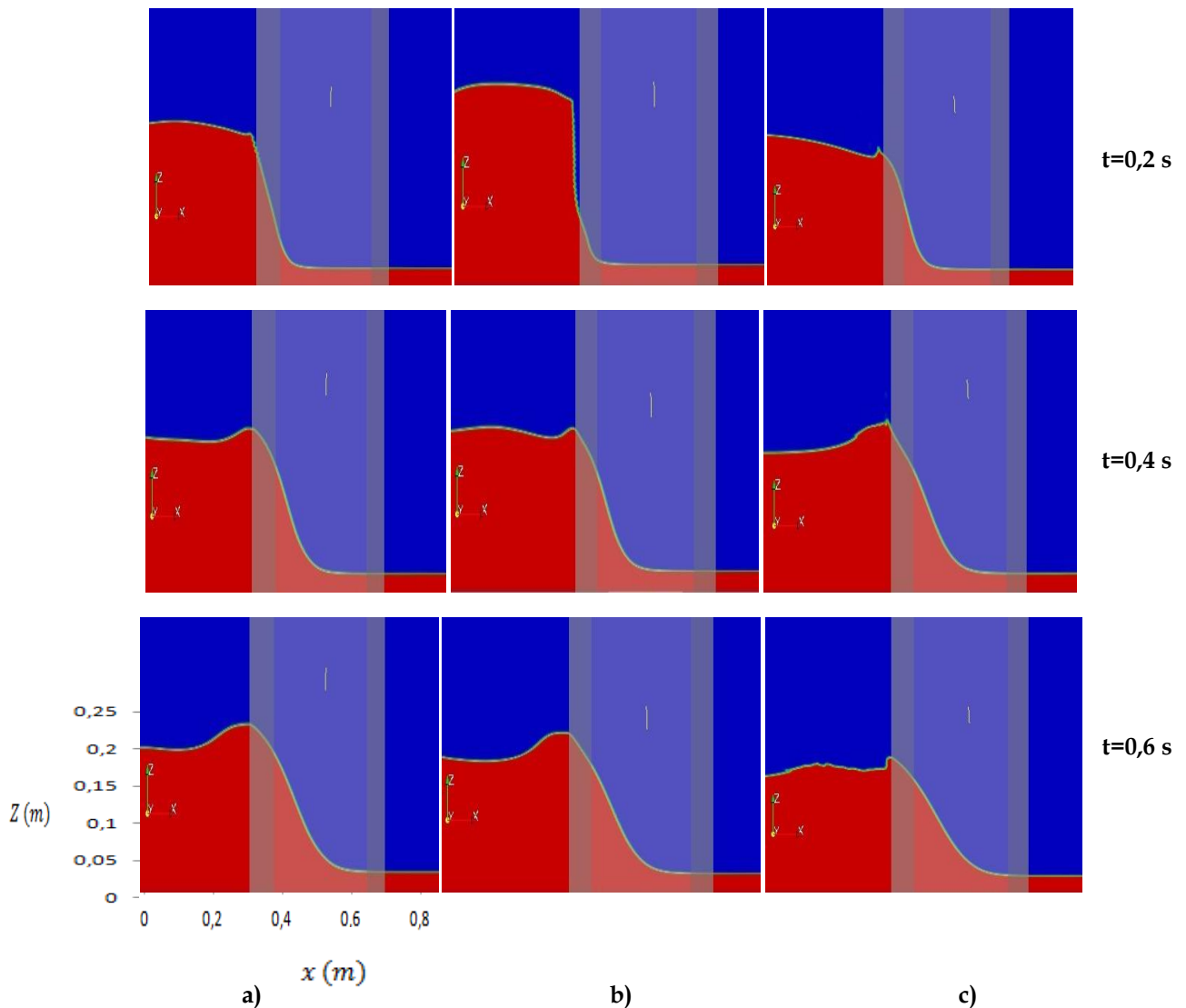


Figura 10: Resultados das simulações para: a) $K-\varepsilon$; b) $K-\omega$; c) sem turbulência.

Como foi apresentado anteriormente, é nos instantes iniciais que a dependência da turbulência se faz sentir com maior efeito. Nos resultados obtidos podemos ver discrepâncias entre as simulações, especialmente para o instante $t=0,2$ s. Os resultados obtidos com o modelo $K - \omega$ não se ajustaram bem comparativamente ao modelo $K - \varepsilon$ e a simulação efetuada sem turbulência, cujos resultados foram bastante idênticos durante toda a simulação. Este facto deve-se a um n° de Re relativamente baixo durante a simulação. Contudo depois dos primeiros instantes seria de esperar uma concordância entre as simulações, o que se veio a concretizar nos resultados numéricos.

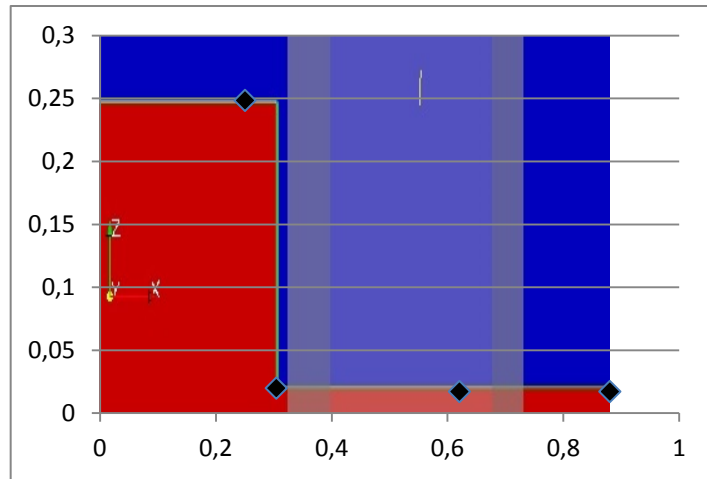
4.5. Validação dos resultados numéricos

Neste subcapítulo são comparados os resultados para a elevação da superfície que melhor se adaptam ao problema. É utilizado o modelo de turbulência $K - \varepsilon$ e a malha mais fina.

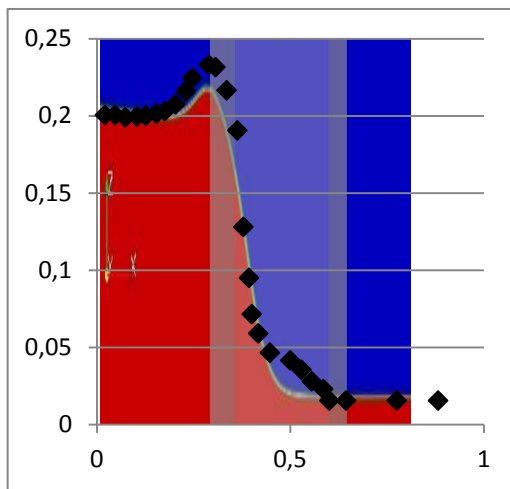
A 1ª simulação foi obtida para uma altura de coluna de água de 25 cm, diâmetro nominal de 1,59 cm e porosidade de 0,49.

A 2ª simulação foi obtida para uma altura de coluna de água de 35 cm, diâmetro nominal de 3 mm e porosidade de 0,39.

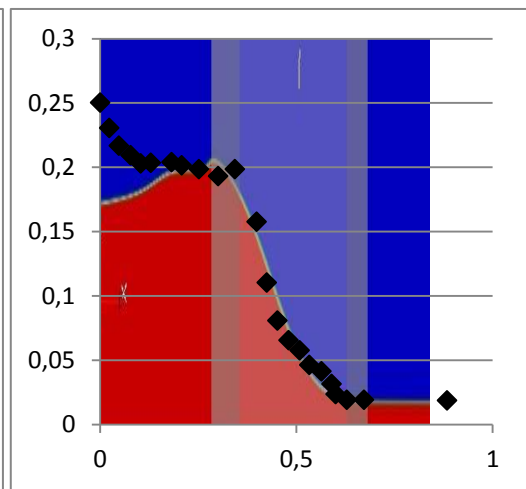
Os resultados obtidos para os 2 casos estão representados nas figuras 11 e 12, onde os resultados numéricos da elevação da superfície estão sobrepostos sobre os resultados experimentais, representados por pontos.



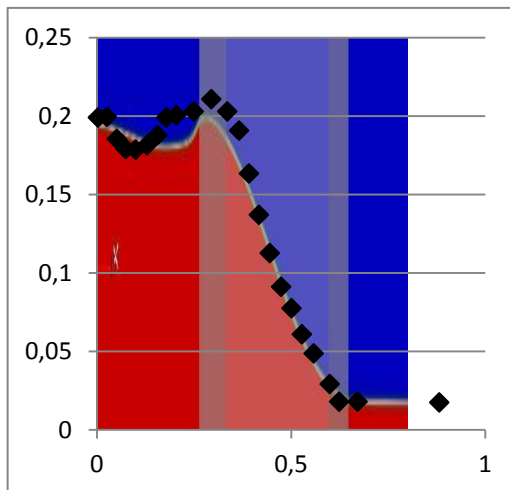
a)



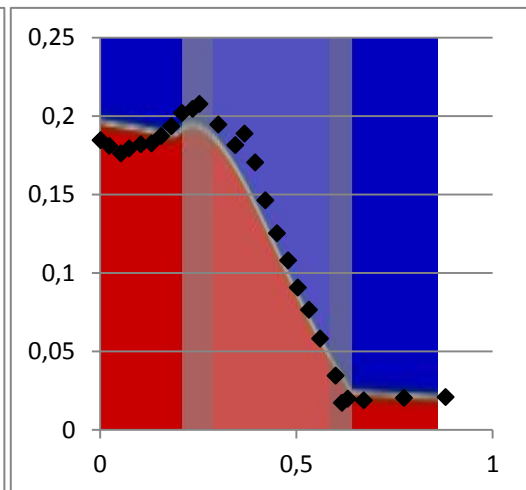
b)



c)

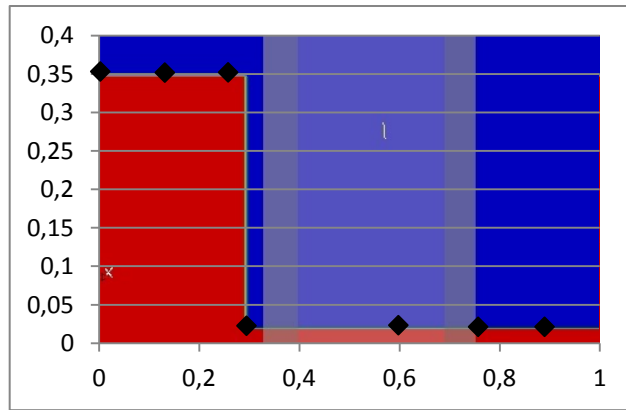


d)

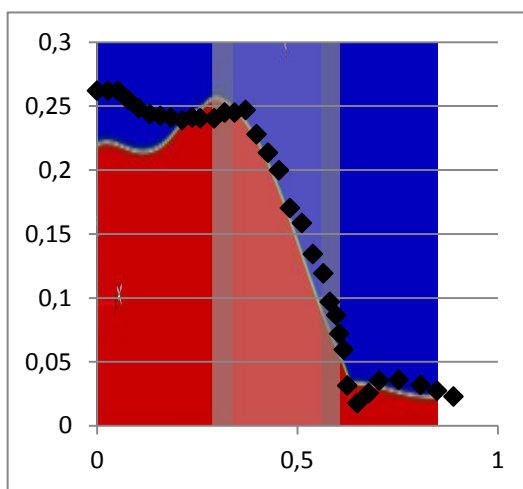


e)

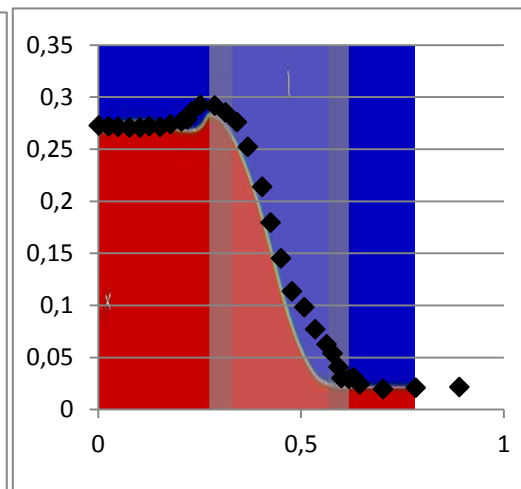
Figura 11: Comparação entre resultados numéricos (linha) e experimentais [7] [17] (pontos) para a 1ª simulação: a) $t=0$ s; b) $t=0,4$ s; c) $t=0,8$ s d) $t=1,2$ s; e) $t=1,6$ s.



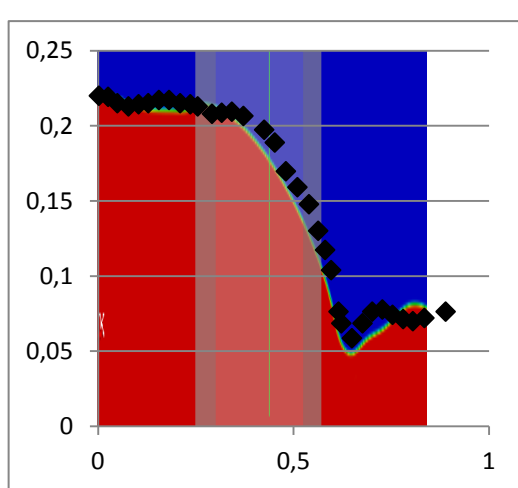
a)



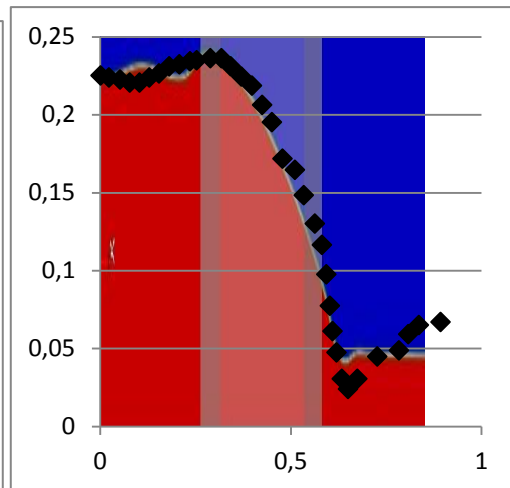
b)



c)



e)



f)

Figura 12: Comparação entre resultados numéricos (linha) e experimentais [7] [17] (ponto) para a 2ª simulação: a) $t=0$ s; b) $t=0,35$ s; c) $t=0,75$ s d) $t=1,15$ s; e) $t=1,55$ s.

Num modo geral as simulações numéricas modelam bem os resultados experimentais, contudo são notórias algumas discrepâncias nas simulações, uma vez que se verifica que o escoamento progride mais lentamente no meio poroso do que o esperado experimentalmente. Outro erro associado à simulação verifica-se nos instantes iniciais devido ao instante onde se retira a porta móvel, que no modelo numérico é instantâneo e experimentalmente não, o que provoca o efeito de arrastamento. Esta discrepância ocorre no início da simulação e com o passar do tempo este efeito é pouco notado.

4.6. Comparação entre o código numérico *PorousWaveFoam* e *IHFOAM*

O código numérico *PorousWaveFoam* está associado à livreria do *waves2foam* (capítulo 3), é formulado de forma idêntica ao *PorousInterFoam* e permite resolver as mesmas equações e os mesmos problemas. Contudo um estudo realizado por Jacobsen [10] relativamente à determinação dos coeficientes para modelar o meio poroso, revela que os coeficientes foram calibrados de acordo com dados experimentais, os quais já incluem naturalmente os efeitos turbulentos. Usando estes coeficientes (calculados no mesmo artigo [10]) no código numérico deixa de ser necessário adicionar modelos de turbulência pois os coeficientes incluem essa contribuição.

Para além da pequena diferença de formulação, o código permite simular casos com geração de ondas, o que torna o código bastante interessante para aplicações da engenharia costeira.

O código numérico *IHFOAM* foi programado para corrigir as limitações e erros do código original do *OpenFoam* (*PorousInterFoam*); tem uma rigorosa implementação das equações *VARANS*; e inclui diversos modelos de turbulência e geração de ondas.

Na figura 13 podemos comparar as soluções obtidas para os 3 códigos usando a mesma malha. À esquerda estão os resultados obtidos para o código

PorousInterFoam, no meio para o código *PorousWaveFoam*, e á direita para o *IHFOAM*.

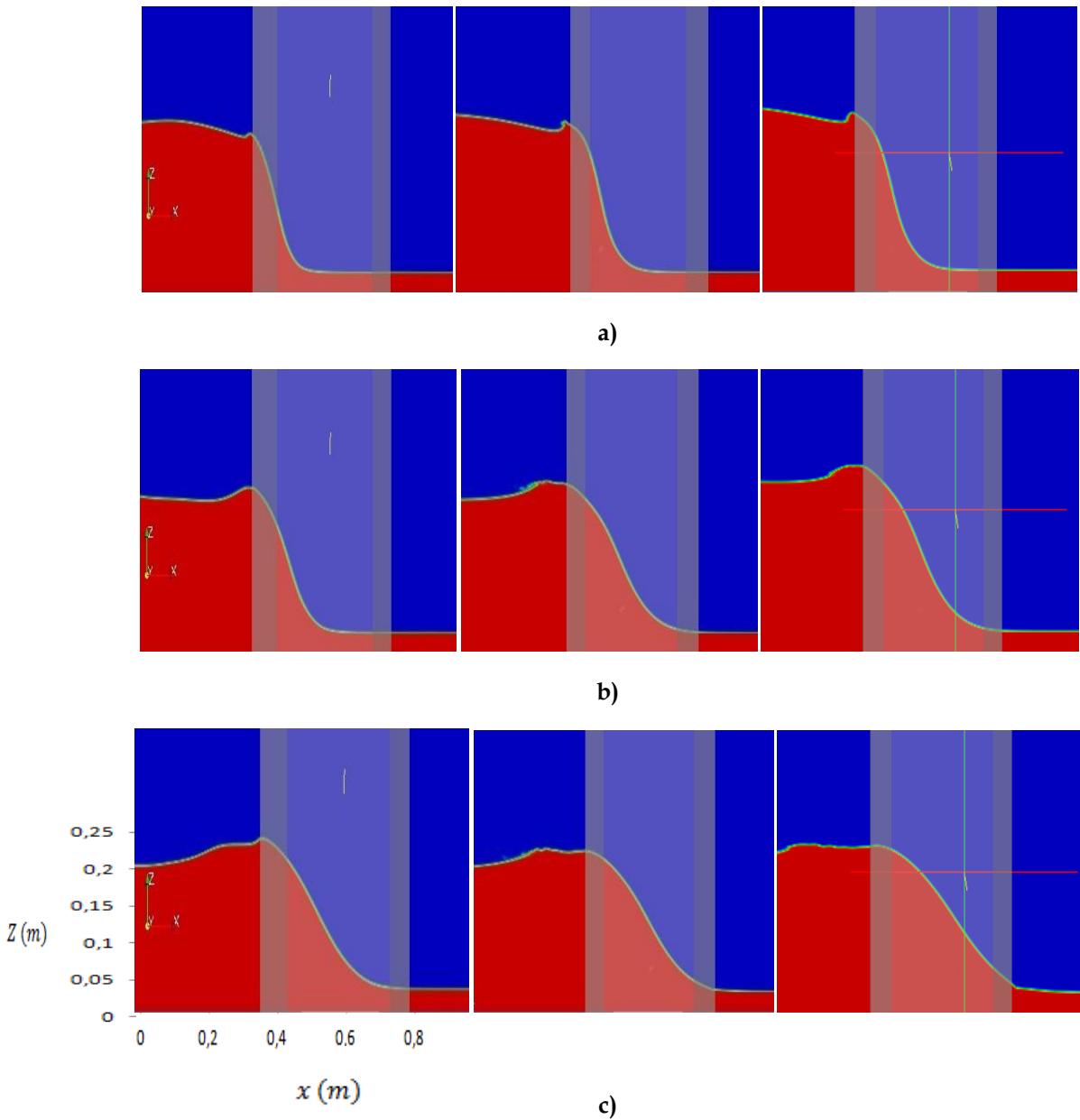


Figura 13: Comparação de resultados *PorousInterFoam* (esquerda) vs *PorousWaveFoam* (meio) vs *IHFOAM* (direita): a) $t=0,2$ s; b) $t=0,4$ s; c) $t=0,6$ s.

Ambos os códigos numéricos adaptam-se bem ao problema descrito, contudo existem algumas diferenças notórias para ambos os códigos.

No *PorousInterFoam* o escoamento no interior do meio poroso desenvolve-se mais lentamente do que nos outros códigos. Os códigos *PorousWaveFoam* e *IHFOAM* apresentam resultados muito similares durante toda a simulação, com resultados muito idênticos aos resultados experimentais [7] [10].

Capítulo 5: Simulação do modelo do quebra-mar poroso de Albufeira

5.1. Modelo Físico

Os ensaios experimentais de propagação de onda e interação com o quebra-mar poroso de Albufeira foram realizados num canal de ondas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), à escala de 1:30 [1][18][19]. O canal de ondas apresenta um comprimento total de 49,4 m, uma largura contante e uma altura de 1,2 m. Experimentalmente foi construído o fundo representativo da aproximação à secção estudada do quebra-mar oeste do porto de Albufeira, figura 14, caracterizado por uma zona horizontal de 23,04 m e uma rampa de 13,96 m com declive 2,1% até à estrutura. O pé do quebra-mar ficou localizado a 37 m do gerador de ondas, constituído por um batedor do tipo pistão. A profundidade da água junto ao batedor foi mantida constante e igual a 0,51 m, o que corresponde a 0,217 m no pé da estrutura. A figura 14 mostra o perfil longitudinal do canal ao longo de todo o comprimento.

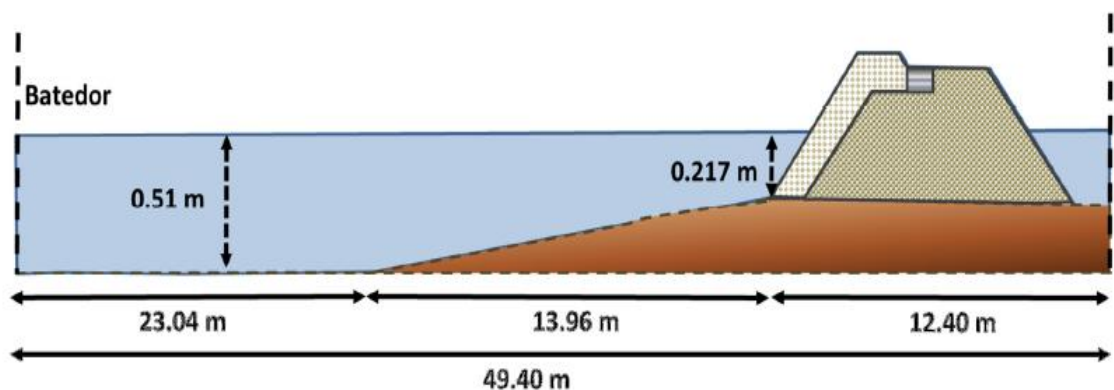


Figura 14: Perfil do canal de ondas dos ensaios experimentais (escala 1:30) [1].

A estrutura modelada no canal, representativa de uma secção do quebra-mar oeste do porto de pesca de Albufeira, é composta por um manto de enrocamento com declive de 1,6:3 e com uma cota de coroamento +7,0 m (ZH) e fundeada a -3,5 m (ZH). Na zona central do quebra-mar existe um passadiço de betão impermeável com 3,0 m de largura, cujo coroamento se encontra a +6,5 m (ZH) e fundeada a +4 m (ZH). O manto exterior é composto por duas camadas de blocos de 90 a 120 kN e apresenta um elevado nível de arrumação dos blocos, produzindo uma camada pouco porosa. A figura 15, mostra o perfil transversal da secção modelada e da estrutura no canal de ondas [1].

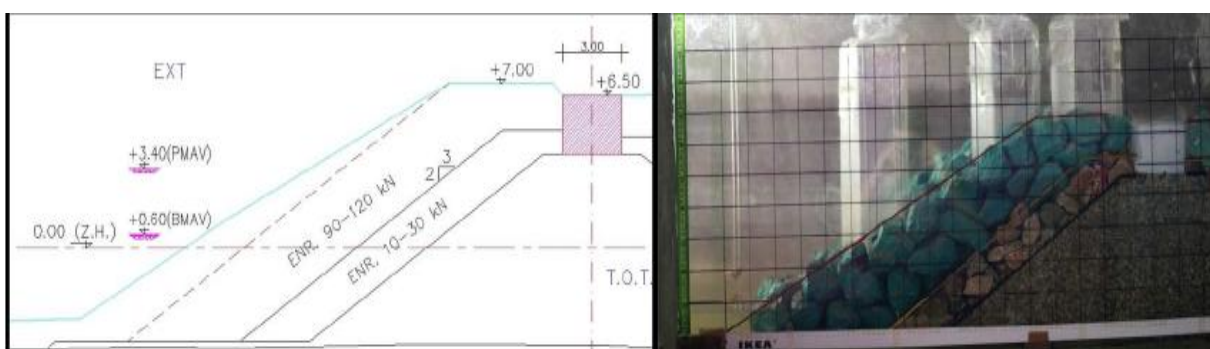


Figura 15: Secção do quebra-mar, protótipo à escala 1:30 [18] [19].

Nos ensaios experimentais foram testadas ondas regulares, variando a altura de onda e o período. Ao longo do canal foram colocadas dez sondas resistivas para medir a elevação da superfície livre em dez posições distintas, tanto a barlar da estrutura como no seu interior e no coroamento.

A tabela 3, indica a posição, no canal, das sondas de elevação da superfície livre G2 a G11, considerando o referencial Oxy no início da zona de propagação de ondas, como se pode observar na figura 16. A sonda G2, localizada no início da rampa, foi colocada com a função de controlar a onda gerada pelo batedor e poder comparar a elevação de superfície gerada com e sem quebra-mar. As sondas G3 a G7 permitiram obter as séries temporais da elevação da superfície livre a barlar da estrutura. As sondas G8 a G10 foram inseridas no interior da estrutura. A sonda G11 foi colocada na zona impermeável, para captar o volume de água galgada [1].

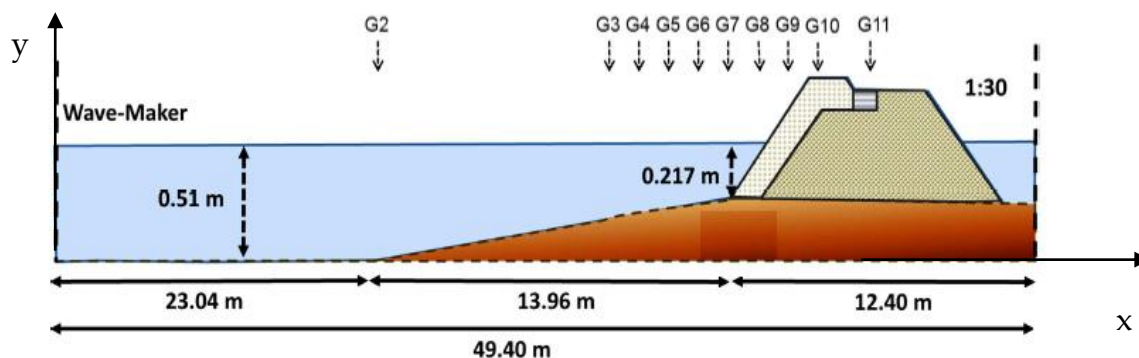


Figura 16: Modelo experimental com indicação das sondas [19].

Tabela 3: Posição das sondas ao longo do canal

Sonda	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11
Posição (m)	23,04	33,21	34,47	34,97	35,77	36,945	37,297	37,56	37,745	37,875

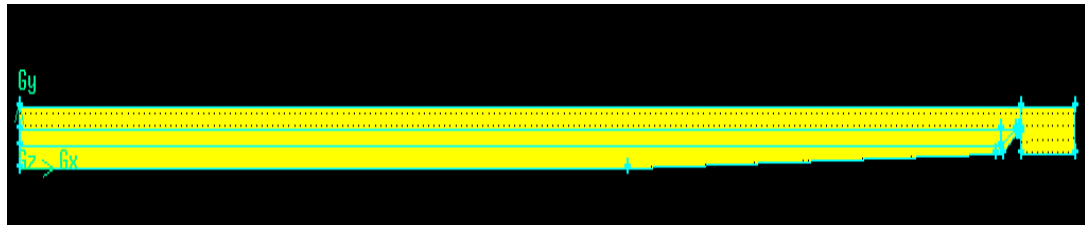
5.2. Geometria

A geometria criada para modelação numérica pretende representar as condições em ambiente costeiro, simulando tanto a propagação de ondas como a interação das ondas numa estrutura costeira porosa em 2D.

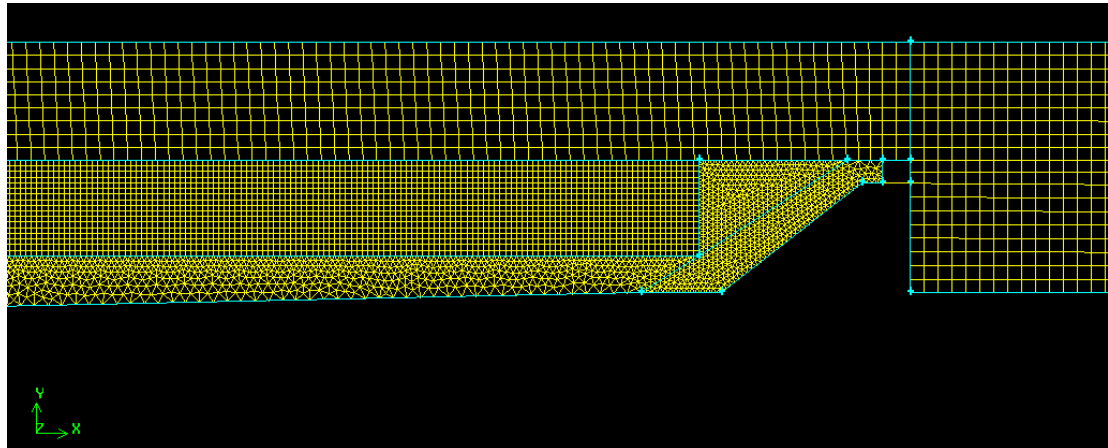
Criou-se um domínio computacional com elementos quadriláteros, principalmente densa na zona de propagação de onda, e elementos triangulares na zona do quebra-mar poroso devido à complexidade da geometria, com um total de 83892 elementos.

A malha possui 8 elementos por altura de onda e 40 elementos por comprimento de onda.

A figura 17 mostra a malha gerada para a simulação numérica usando o código de geração de malha, *GAMBIT* (versão 2.4.6).



a)



b)

Figura 17: Malha gerada para simulação numérica: a) Domínio completo; b) Ampliado na zona do quebra-mar.

5.3. Modelo Numérico

O modelo numérico é simulado no *OpenFoam* recorrendo ao *porousWaveFoam* e a simulação realizou-se para uma onda incidente regular, recorrendo à teoria de ondas *StokeFirst* (capítulo 2) com um período de 12 s, uma altura de onda de 2,5 m, que corresponde a 2,191 s para o período de onda e 0,083 m de altura de onda para o modelo à escala 1:30.

O tempo de simulação é de 40 s, com um passo de tempo de 0,01 s.

O meio poroso é definido por o diâmetro dos blocos e a porosidade relativa, contudo estes dois parâmetros são uma estimativa, uma vez que não se sabe em concreto os seus valores. Considerou-se $d_p = 2 \text{ cm}$ e $\phi = 0,5$.

Numa primeira fase foram feitas simulações sem a presença do quebra-mar e assim obter a elevação da superfície das ondas regulares e comparar os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo *OpenFoam* e *FLUENT* [1].

Numa segunda fase é feita a simulação completa do modelo recorrendo ao *OpenFoam*, é feita uma análise de resultados e em seguida uma comparação com os resultados experimentais.

5.4. Resultados obtidos

Na figura 18 encontram-se os instantes de interação de onda com a estrutura porosa nos ensaios experimentais e no modelo numérico.

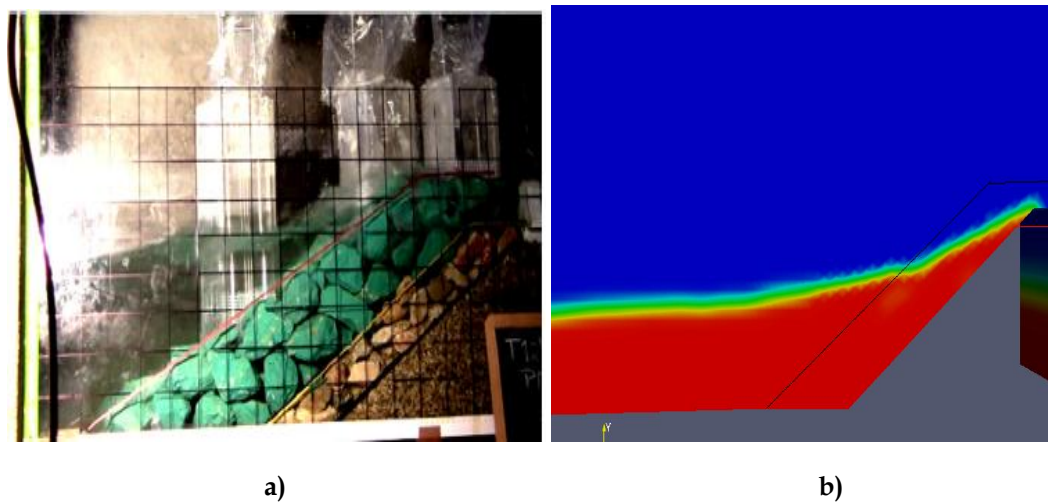


Figura 18: Interação de onda com estrutura porosa: a) Modelo experimental; b) Modelo numérico.

Para o modelo considerou-se apenas meio poroso na camada de blocos exteriores, uma vez que o núcleo do quebra-mar é considerado praticamente impermeável.

A figura 19 apresenta a elevação da superfície livre na sonda G2 obtida pelo *OpenFoam*, *FLUENT* e os resultados experimentais realizados no LNEC [1], sem o quebra-mar poroso.

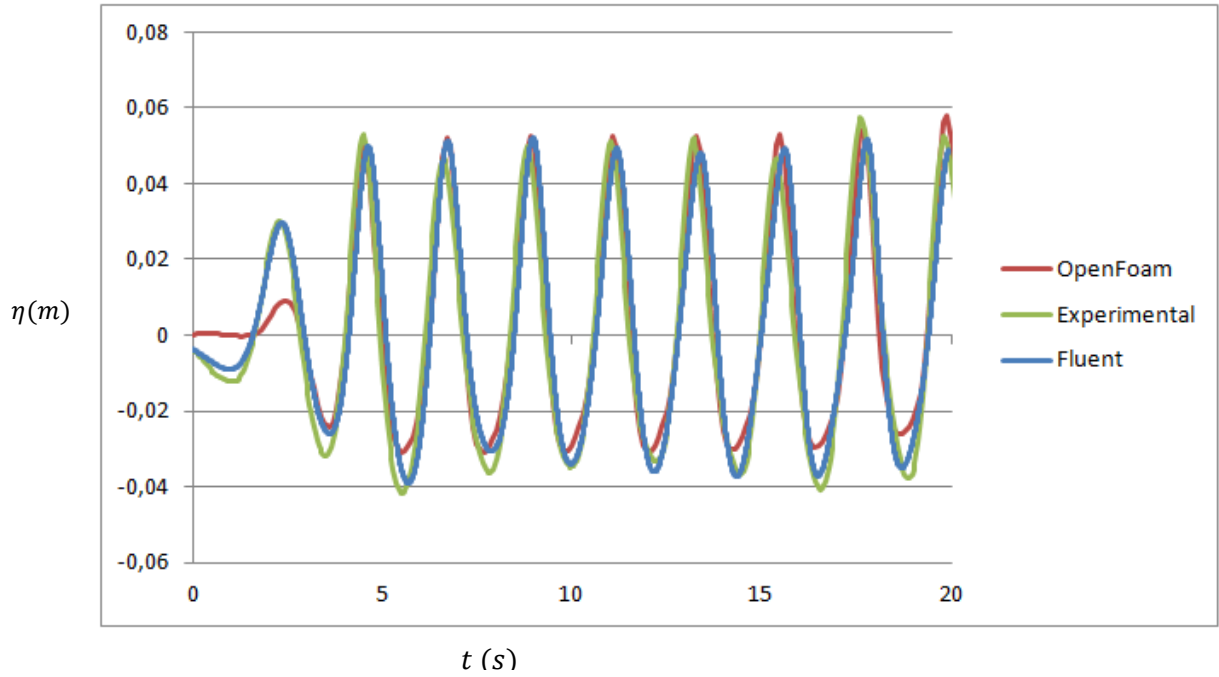


Figura 19: Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G2 sem a presença do quebra-mar.

Os dois modelos numéricos permitem modelar com precisão o movimento da superfície livre na sonda G2.

De modo a avaliar a diferença de resultados numéricos com experimentais, efetuou-se uma análise estatística de modo a avaliar os resultados obtidos.

Podemos estimar o enviesamento (5.1), a raiz do erro quadrático médio (5.2) e o índice de concordância (5.3):

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^l (y_i - x_i)}{n} \quad (5.1)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (5.2)$$

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l |y_i - x_i|}{\sum_{i=1}^l (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (5.3)$$

Onde x_i são os valores experimentais, y_i os valores numéricos, \bar{x} é a média do valor experimental e l é o número de pontos considerados. O parâmetro *bias* quantifica o afastamento dos resultados do modelo numérico em relação aos de referência. O índice de concordância varia de zero a um, sendo que quanto maior é o valor, maior a concordância entre os resultados.

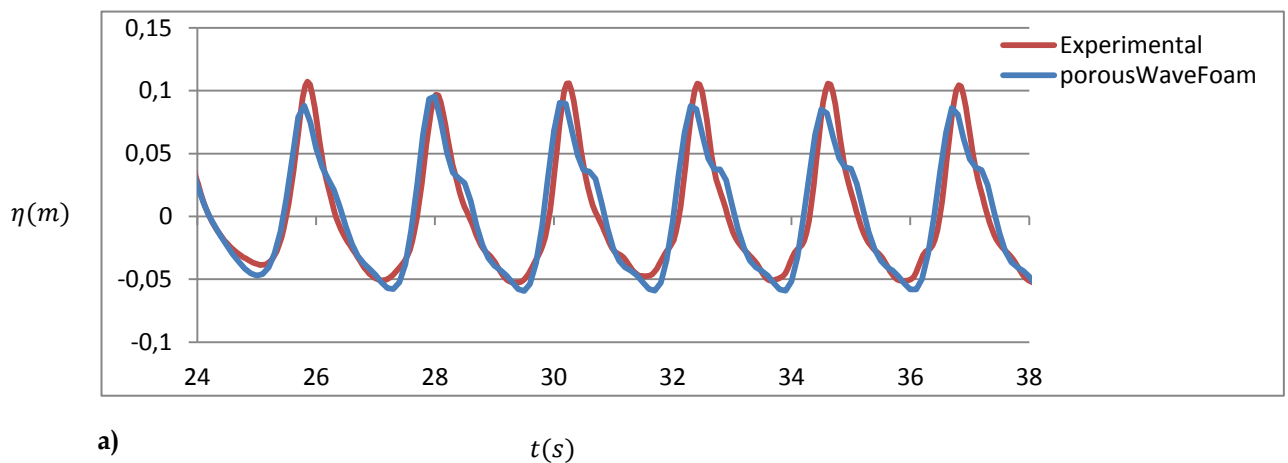
Na tabela 4 estão os valores estatísticos obtidos, comparando assim os valores numéricos relativos ao *FLUENT* [1] e ao *OpenFoam*.

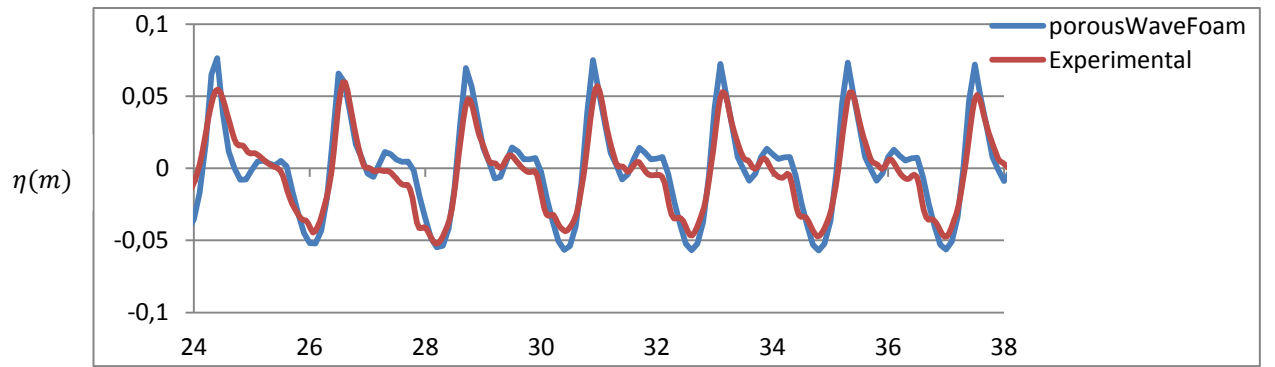
Tabela 4: Dados estatísticos para a sonda G2

	<i>bias</i>	<i>rmse</i>	<i>ic</i>
<i>FLUENT</i> [1]	$4,65 \times 10^{-4}$	$4,48 \times 10^{-3}$	99,3 %
<i>OpenFoam</i>	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-2}$	98 %

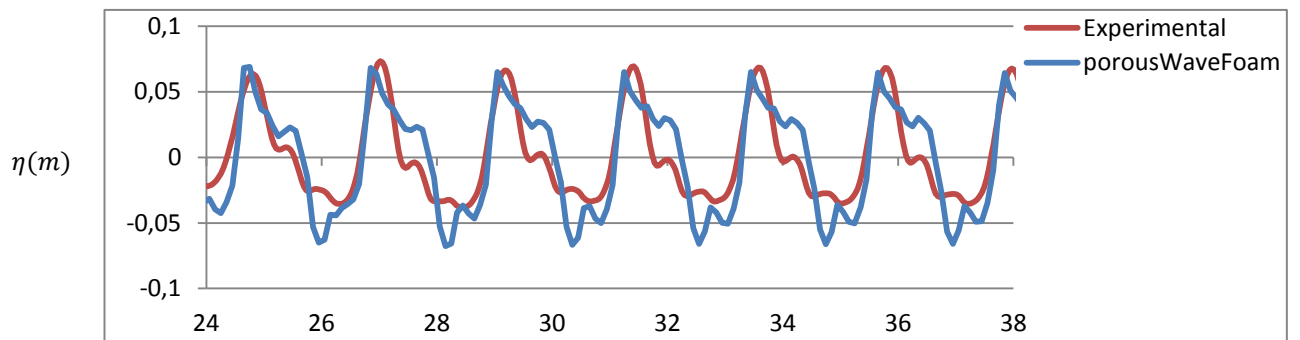
Os valores estatísticos apresentados na tabela 4 permitem confirmar que ambos os modelos numéricos apresentam uma boa concordância de resultados relativamente aos dados experimentais para a elevação da superfície livre, onde se obteve *ic* bastante bons.

Em seguida são apresentados os resultados da elevação da superfície livre para as sondas nas posições antes (G6, G7) e no quebra-mar poroso (G8, G9, G10). Os resultados apresentam a elevação da superfície livre em metros, em função do tempo, em segundos.

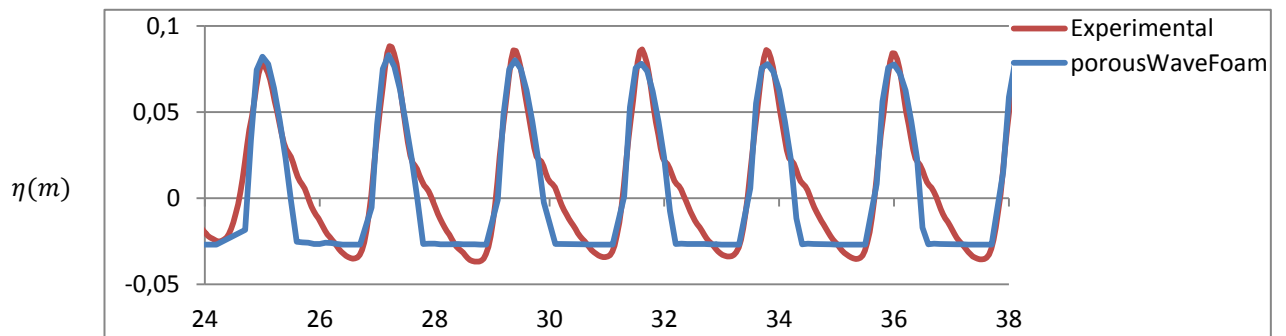




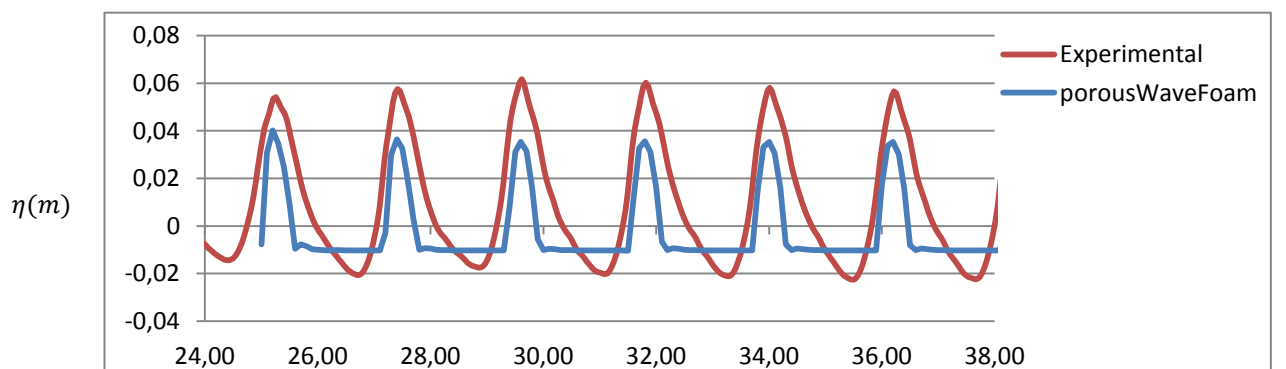
b)



c)



d)



e)

Figura 20: Elevação da superfície para os resultados experimentais e numéricos.

O modelo numérico demonstra uma boa correlação de resultados, modelando relativamente bem o efeito da reflexão e da interação de onda com o quebra-mar.

Para as sondas a barlamar do quebra-mar (G6 e G7) obteve-se resultados bastante próximos do esperado. São observadas discrepâncias maiores nas sondas localizadas no quebra-mar (G8, G9 e G10). Devido às estimativas dos parâmetros do modelo poroso e por considerar-se o núcleo do quebra-mar impermeável.

Estas discrepâncias devem-se sobretudo à colocação das sondas no interior do quebra-mar para a realização dos ensaios experimentais, o que não foi possível adaptar para o modelo numérico, deve-se às estimativas dos parâmetros do modelo poroso e por considerar-se o núcleo do quebra-mar impermeável.

Por outro lado o uso de equações de escoamento incompressível para a zona de rebentação de onda podem não ser as mais adequadas, assim como a simulação em 2D, o que implica que o ar não se pode movimentar ao longo do quebra-mar, o que não se verifica experimentalmente.

Não são verificados galgamentos nos resultados experimentais, nem nos resultados numéricos.

A figura 21 mostra a evolução da altura de onda significativa, H_s , e o período significativo, T_s . A altura de onda significativa mantém o valor igual à altura de onda, 0,083 m até se sentirem os efeitos de reflexão de onda, isto devido à interação da onda com o quebra-mar. O tempo de simulação não foi o suficiente para a reflexão se propagar ao longo de todo o canal. Este mesmo efeito é observado no período significativo.

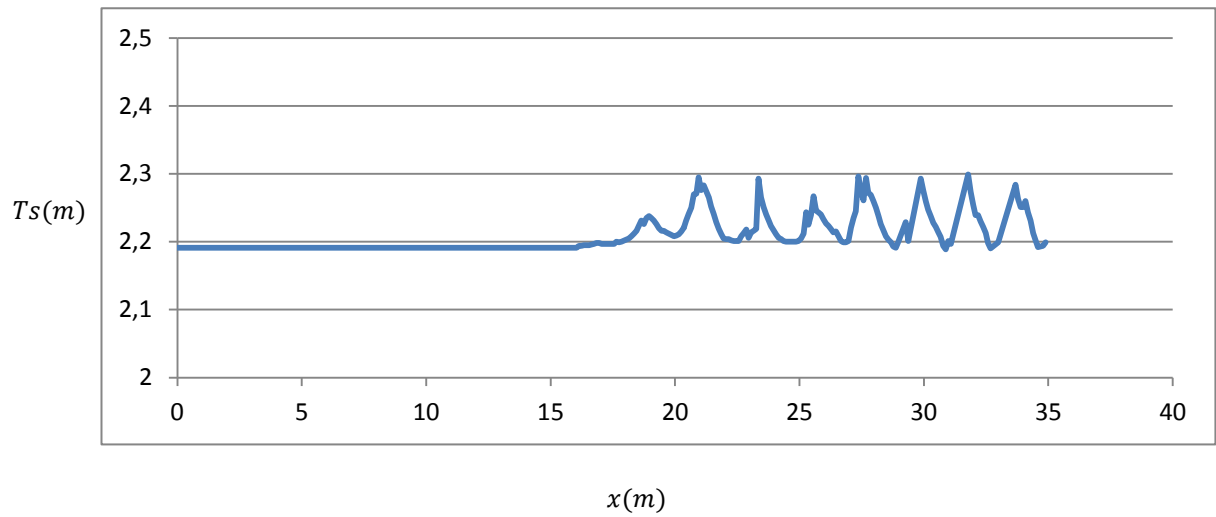
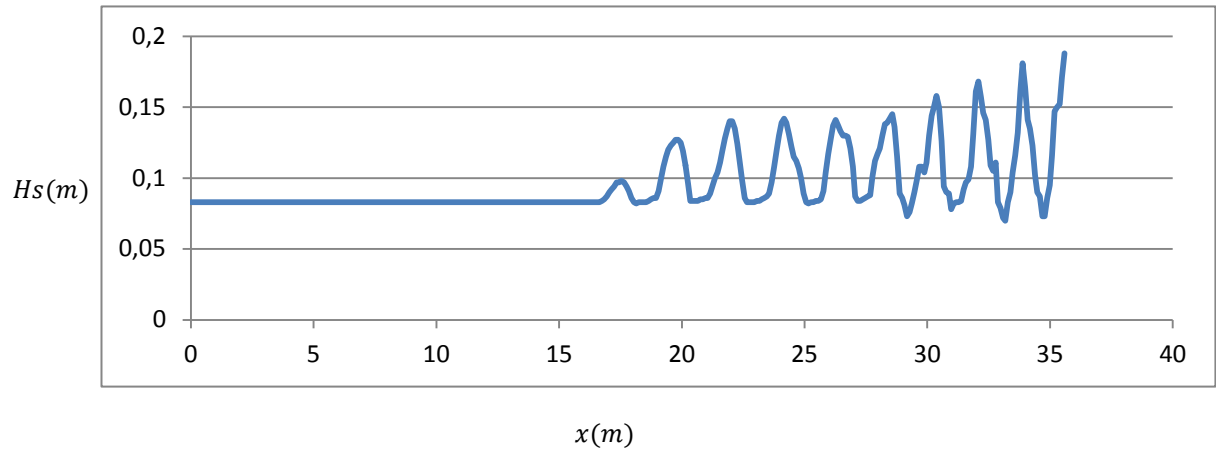


Figura 21: Altura significativa e período significativo ao longo do canal

Capítulo 6: Conclusões e recomendações

6.1. Conclusões

A presente dissertação permitiu estudar e analisar o desempenho do código numérico *OpenFoam* para o escoamento em meio poroso, através de simulações numéricas.

Numa primeira fase foi feito o estudo do código *porousInterFoam* com os resultados experimentais [15], sendo que se constatou que o código modela bem os resultados experimentais sobretudo com o modelo de turbulência $K - \epsilon$. Contudo, o escoamento desenvolveu-se mais lentamente no interior do meio poroso do que o verificado experimentalmente.

No seguimento desta validação, foi feita uma comparação entre o *porousInterFoam* e os solvers *porousWaveFoam* e *IHFOAM*, onde se verificou que estes dois últimos apresentam uma aproximação mais realista da queda da coluna de água com o meio poroso.

Posteriormente foram feitas simulações numéricas recorrendo ao solver *porousWaveFoam*, para simular a propagação de ondas regulares e a sua interação com um modelo de quebra-mar poroso.

Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente no LNEC para o modelo à escala 1:30. A comparação de resultados permitiu verificar o bom desempenho do código numérico para este tipo de aplicações costeiras. A elevação da superfície é bem estimada, quer a barlamar, quer no meio poroso.

Conclui-se assim, que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas e/ou ao próprio modelo de meio poroso.

6.2. Trabalho futuro

Em relação à validação do *PorousInterFoam*, os coeficientes e a formulação do código devem ser revistos com o intuito de melhorar os resultados obtidos. Deve testar-se depois o código em 3D à semelhança do código *IHFOAM*.

Fica como sugestão simular o quebra-mar poroso de Albufeira recorrendo ao código *IHFOAM*, uma vez que o código apresenta bons resultados e inclui livrarias de geração de ondas.

Referências Bibliográficas

- [1] Soares, H., 2013. *Estudo do quebra-mar do porto de pesca de Albufeira: Modelação numérica do galgamento usando um modelo SPH*. Tese de mestrado, FCT-UNL.
- [2] Z. Demirbilek, C. Vicent, 2002. *Water Waves Mechanics*. Coast Eng Manual, Washington, D.C., U.S. Army Corps of Engineers.
- [3] http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19bu/node3.html (Acedido Setembro 2014).
- [4] Morgan, G., 2013. *Application of the interFoam VoF code to coastal wave/structure interaction*. Tese de doutoramento, University of Bath.
- [5] Dias, J.P., 2011. *Simulação do escoamento em turbinas colocadas numa falésia*. Tese de mestrado, FCT-UNL.
- [6] Jambhekar, V., 2011. *Forchheimer Porous-media Flow Models – Numerical Investigation and Comparison with Experimental Data*. Tese de mestrado, University of Stuttgart.
- [7] Lara, J.L, del Jesus, M., Losada,I.J, 2012. *Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures Part I: Numerical model formulation*. Coast. Eng. 64, 57-72.

- [8] OpenFOAM, 2013. OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox User Guide. Version 2.2.1.
- [9] Lara, J.L, del Jesus, M., Losada,I.J, 2013. *Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models Application to OpenFoam*. Coast. Eng. 71, 102-118.
- [10] Jacobsen, N.G, Christensen, E.D, Jensen, B, 2014. *Investigation on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures*. Coast. Eng. 84, 56-72.
- [11] Moreira, T., 2012. *Contribuição para a validação do código numérico OpenFoam em escoamentos com superfície livre*. Tese de mestrado, FCT-UNL.
- [12] IHFOAM, 2014. IHFOAM - The IHFOAM Manual.
- [13] Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974. *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3.
- [14] Wilcox, D. C., 1994. *Simulating Transition with a Two-equation Turbulence Model*. Vol. 32.
- [15] Lin, P., 1998. *Numerical modeling of breaking waves*. Ph.D. thesis, Cornell University.
- [16] Silva, J., 2014. *Análise do Galgamento onda a onda em estruturas marítimas*. Tese de mestrado, IST Lisboa.

[17] Lara, J.L, del Jesus, M., Losada,I.J, 2014. *Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFoam Part I: Formulation and validation*. Coast. Eng. 83, 243-258.

[18] Didier. E, D.R.C.B. Neves, P.R.F. Teixeira, H. Soares, 2013. *Coupling of fluinco mesh-based and sph mesh-free numerical codes for the modeling of wave overtopping over a porous breakwater*. 6th SCACR – International short course on applied coastal research .

[19] Didier. E, D.R.C.B. Neves, P.R.F. Teixeira, 2014. *Sph numerical and physical modeling of wave overtopping a porous breakwater*. 3rd IAHR Europe Congress, Book of proceedings, Porto – Portugal.