



Rafael Abreu Marques

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Estudo numérico da interação de ondas com um
quebra-mar poroso utilizando o código IHFOAM**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Manuel Paixão Conde, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Vogal: Prof. Doutor Eric Lionel Didier

Vogal: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

Estudo numérica da interação de ondas com um quebra-mar poroso utilizando o código IHFOAM

Copyright © Rafael Abreu Marques, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostava de agradecer a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias, pelos conhecimentos transmitidos ao longo dos 5 anos de curso.

Queria agradecer em particular ao meu orientador, Professor Doutor José Conde, pela oportunidade de realizar a dissertação na área da Mecânica de Fluidos Computacionais e também por todo o tempo dispensado e pelo apoio prestado ao longo deste trabalho.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, pela educação e pelas condições que me deram, pelo apoio permanente e pela oportunidade que me deram em ingressar no ensino superior. Também pela paciência e pela confiança que depositaram em mim. Quero agradecer aos meus avós pelo apoio dado e dedicar este trabalho ao meu avô, que se estivesse cá ficaria muito orgulhoso, sem ele não teria esta oportunidade.

Quero agradecer ao meu irmão Roberto, pela companhia que sempre me fez, pela maior amizade, pelo apoio, pelos conselhos e pelos ensinamentos que sempre me deu.

À minha namorada Andreia, pela compreensão, pelo apoio nas horas de trabalho e pelo apoio e estabilidade emocional, que me deu nestes cinco anos. Pela capacidade de me distrair e de me ajudar a focar nos momentos certos neste percurso académico

A todos os meus amigos e colegas, que sempre me apoiaram, ajudaram, que me transmitiram a confiança necessária, pelo trabalho conjunto e pela diversão que tivemos neste período da minha vida. Em especial, quero agradecer ao Carlos Sopas e ao Fábio Dias por todo o tempo que passámos juntos.

Obrigado a Todos!

Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo a validação da ferramenta *IHFOAM* do código *OpenFOAM* para problemas de interação de ondas com estruturas costeiras porosas, concretamente a interação de ondas com o quebra-mar poente do porto de pesca de Albufeira.

Numa primeira parte deste trabalho analisa-se o comportamento do código com malhas de diferentes tipos, mais especificamente, estuda-se os efeitos sobre o escoamento de uma malha não estruturada no meio poroso em relação a uma malha estruturada. Isto é de extrema importância, devido ao tempo dispensado na construção de uma malha estruturada com elementos rectangulares. É ainda estudada a dependência da simulação numérica com o modelo de turbulência. O estudo mostra que os efeitos dos diferentes tipos de malha na zona porosa influenciam pouco o escoamento, sendo aceitável o recurso a malhas não estruturadas na zona porosa, em contraste com a escolha do modelo de turbulência que se mostra muito importante para a simulação.

Numa segunda parte, são calibrados os parâmetros do meio poroso usados pelo modelo numérico. Apresenta-se o método utilizado para a calibração dos parâmetros e são estudados os seus efeitos sobre o comportamento hidráulico da estrutura. O estudo é realizado com duas alturas de ondas, uma altura de onda que não gera galgamento e uma altura de onda que gera galgamento. Foram colocadas várias sondas numéricas ao longo de um canal de ondas que medem a elevação de superfície livre simulada. Para os ensaios com galgamento, mediu-se a altura da água galgada e o volume galgado, podendo-se assim estudar os efeitos dos parâmetros do meio poroso do quebra-mar sobre o galgamento. A calibração sequencial dos parâmetros mostrou-se muito eficaz, gerando resultados muito bons. Ao longo do estudo entende-se a forte dependência do comportamento hidrodinâmico da estrutura, dos parâmetros e a necessidade de os calibrar, para cada caso estudado.

Conclui-se que o *IHFOAM* é muito interessante para o estudo numérico de interação de onda-estrutura porosa, obtendo resultados satisfatórios para a superfície livre dentro e fora do quebra-mar. O galgamento, sendo um processo muito rápido, foi razoavelmente simulado e captado pelo código.

Palavras-chave: Quebra-mar de talude; Meio Poroso; OpenFOAM; IHFOAM; Galgamento

Abstract

The prime objective of this dissertation is the IHFOAM validation, which is an OpenFoam toolbox, to solve problems of wave interaction with porous coastal structures, most precisely the wave interaction with the West rubble-mound breakwater of Albufeira Harbor.

On the first section of this work, the behavior of the code with different types of meshes is analyzed, most specifically, are studied the effects of a non-structured mesh in a relation to a structured mesh, on the flow in porous media. This is a case of extreme importance, due to the time that it takes to create a structured mesh with rectangular elements. The dependence of the turbulence model is also studied. The present study reveals that the effects of the different types of meshes in the porous zone have a small influence on the flow, this shows that the use of non-structured meshes in porous zones is acceptable, in contrast of the turbulence model, that is really important for the simulation.

On the second section, the porous media parameters used by the numerical model are calibrated. The applied method to calibrate the parameters is introduced, and its effects over the hydraulic behavior of the structure are also studied. Several numerical gauges were placed over a numerical wave flume to measure the simulated free surface elevation. For the overtopping assays, the transposed water's height and also the transposed water volume was calculated, so that the effects of the porous zones' parameters over the overtopping can be analyzed.

The parameters' sequence calibration has shown itself really effective, creating excellent results. Throughout this study, the strong dependence of the structure's hydrodynamic behavior on the parameters, becomes clear, and the need to calibrate them, in every case that is studied.

In conclusion, the IHFOAM is very interesting tool for the numerical study of the wave interaction with coastal porous structures, revealing satisfying results in- and outside of the breakwater. The overtopping, being a fast and complex event, became fairly simulated and captured by the code.

Keywords: Rubble mound breakwater; Porous Media; OpenFOAM; IHFOAM; Overtopping

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas	xix
Nomenclatura.....	xxi
Abreviaturas e acrónimos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização.....	3
2 Caracterização teórico-experimental.....	5
2.1 Agitação marítima	6
2.2 Teoria de ondas linear	8
2.3 Teoria de ondas não linear.....	11
2.4 Interação de ondas com quebra-mares porosos	12
2.4.1 Galgamento.....	17
2.5 Escoamento no meio poroso.....	18
2.6 Formulação do meio poroso	19
2.6.1 Escoamento Estacionário.....	19
2.6.2 Escoamento não estacionário.....	25
3 Código Numérico	27
3.1 OpenFOAM.....	27
3.1.1 Métodos de discretização.....	29
3.1.2 Esquemas numéricos e algoritmos de resolução.....	29
3.2 IHFoam.....	31
3.3 Swak4Foam.....	33
3.3.1 Captura do caudal galgado.....	33

3.4	Modelos matemáticos	34
3.4.1	Equações VARANS	34
3.4.2	Método VOF	39
4	Estudo da dependência da malha e modelo de turbulência	41
4.1	Rutura de coluna de água no meio poroso	42
4.1.1	Condições de simulação	43
4.1.2	Comparação de resultados	45
4.2	Quebra-mar poroso	48
4.2.1	Domínio de estudo	48
4.2.2	Condições de simulação	50
4.2.3	Malhas em estudo	52
4.2.4	Comparação de resultados	54
4.3	Modelo de turbulência k- ϵ	56
4.3.1	Comparação de resultados	57
5	Caso de Estudo: Interação de ondas com um quebra-mar poroso	61
5.1	Descrição do protótipo	62
5.2	Descrição experimental	63
5.3	Descrição das Simulações numéricas	65
5.3.1	Domínio em estudo	65
5.3.2	Geração de malha	66
5.3.3	Condições de simulação	67
5.4	Interação de ondas com um quebra-mar poroso sem galgamento	67
5.4.1	Calibração dos parâmetros do meio poroso	68
5.4.2	Calibração da porosidade	69
5.4.3	Calibração do coeficiente de resistência não linear, β	76
5.4.4	Discussão de resultados	84
5.5	Interação de ondas com um quebra-mar poroso com galgamento	86
5.5.1	Calibração dos parâmetros do meio poroso	86
5.5.2	Calibração da porosidade	87
5.5.3	Calibração do coeficiente de resistência não linear, β	95
5.5.4	Discussão de resultados da calibração	104
5.5.5	Comparação do melhor ensaio com os dados experimentais	105
6	Conclusões e trabalhos futuros	111
7	Bibliografia	115

Anexo 1.....	121
Anexo 2.....	122

Índice de Figuras

FIGURA 2.1. PARÂMETROS DA ONDA (DEMIRBILEK, Z & VINCENT, C. L., 2002).....	7
FIGURA 2.2. ÓRBITA DAS PARTÍCULAS (DEMIRBILEK, Z & VINCENT, C. L., 2002).....	8
FIGURA 2.3. DERIVA DE <i>STOKES</i> (ADAPTADO DE WEBB, 2013).....	8
FIGURA 2.4. TEORIAS DE ONDAS (LEMÉHAUTE, 1976).....	12
FIGURA 2.5. REPRESENTAÇÃO DAS REGIÕES DO QUEBRA-MAR POROSO (ADAPTADO DE MUTTRAY, 2000).....	13
FIGURA 2.6. CLAPÓTIS PARCIAL (ADAPTADO DE MUTTRAY, 2000).....	13
FIGURA 2.7. ATENUAÇÃO DA ALTURA DA ONDA NO MEIO POROSO (ADAPTADO DE MUTTRAY, 2000).....	15
FIGURA 2.8. ESQUEMA REPRESENTATIVO DO GALGAMENTO.....	17
FIGURA 2.9. REPRESENTAÇÃO DAS REGIÕES DE ESCOAMENTO NO MEIO POROSO (BURCHARTH&CHRISTENSEN, 1991).....	21
FIGURA 2.10. ESCOAMENTO EM MEIO POROSO COM $Rep=86$ (DYBBS & EDWARDS, 1984).....	22
FIGURA 2.11. ESCOAMENTO EM MEIO POROSO COM $Rep=225$ (DYBBS & EDWARDS, 1984).....	23
FIGURA 2.12. ESCOAMENTO EM MEIO POROSO COM $Rep=305$ (DYBBS & EDWARDS, 1984).....	23
FIGURA 2.13. REPRESENTAÇÃO DE β EM FUNÇÃO DO Kc , β ESTACIONÁRIO (ESQ.), β OSCILATÓRIO (DIR.) (VAN GENT, 1995).....	26
FIGURA 3.1. REPRESENTAÇÃO DAS CÉLULAS USADAS NA CAPTURA DO GALGAMENTO.....	34
FIGURA 3.2. REPRESENTAÇÃO DO FUNDAMENTO DAS VARANS (HIGUERA, 2015).....	37
FIGURA 4.1. DOMÍNIO DO TANQUE EM ESTUDO COM A CONDIÇÃO INICIAL (DIMENSÕES EM METROS).....	42
FIGURA 4.2. MALHAS TESTADAS COM PORMENOR DO REFINAMENTO. MALHA 1 E 3 COM ELEMENTOS QUADRADOS NO MEIO POROSO, MALHA 2 E 4 COM ELEMENTOS TRIANGULARES NO MEIO POROSO.....	43
FIGURA 4.3. COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS. NOS INSTANTES $T=0$ S E $T=0.35$ S.....	45
FIGURA 4.4. COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS. NOS INSTANTES $T=0.75$ S; 1.15 S; 1.55 S.....	46
FIGURA 4.5. COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS. NO INSTANTE $T=1.95$ S.....	47
FIGURA 4.6. DOMÍNIO COMPUTACIONAL DO ESTUDO DA DEPENDÊNCIA DA MALHA.....	49
FIGURA 4.7. ESQUEMATIZAÇÃO DA ESTRUTURA MODELADA. (SIMPLIFICAÇÃO A TRAÇO TRACEJADO).....	49
FIGURA 4.8. LOCALIZAÇÃO DAS SONDAS NO CANAL DE ONDAS NUMÉRICO.....	50
FIGURA 4.9. MALHA COM ELEMENTOS RECTANGULARES EM TODO O DOMÍNIO FORA E DENTRO DO QUEBRA-MAR (TRAÇO GROSSO SÃO LINHA CONSTRUIDAS; TRAÇO FINO SÃO GERADAS PELO GERADOR DE MALHA).....	53
FIGURA 4.10. MALHA MISTA, COM ELEMENTOS RECTANGULARES FORA E TRIANGULARES DENTRO DO QUEBRA-MAR (TRAÇO GROSSO SÃO LINHA CONSTRUIDAS; TRAÇO FINO SÃO GERADAS PELO GERADOR DE MALHA).....	53
FIGURA 4.11. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS ENTRE AS DUAS MALHAS, SONDA 6 E 7 (CIMA E BAIXO RESPETIVAMENTE).....	54
FIGURA 4.12. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS ENTRE AS DUAS MALHAS, SONDA 8 A 10 (DE CIMA A BAIXO RESPETIVAMENTE).....	55

FIGURA 4.13. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM E SEM MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, SONDA 6 A 8 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	57
FIGURA 4.14. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM E SEM MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, SONDA 9 E 10 (EM CIMA E EM BAIXO, RESPETIVAMENTE)	58
FIGURA 5.1. IMAGEM DA ZONA DO ALGARVE E DA ÁREA DO PORTO DE PESCA DE ALBUFEIRA (GOOGLEMAPS, 2015)	61
FIGURA 5.2. REPRESENTAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DO QUEBRA-MAR EM ESTUDO (GOOGLEMAPS, 2015)	62
FIGURA 5.3. SECÇÃO DO QUEBRA-MAR, À ESCALA DE PROTÓTIPO (DIDIER ET AL., 2013).....	63
FIGURA 5.4. DOMÍNIO DA EXPERIÊNCIA FÍSICA.....	63
FIGURA 5.5. SECÇÃO DO MODELO NO CANAL DE ONDAS DO LNEC (VIEGAS, 2014).....	64
FIGURA 5.6. REPRESENTAÇÃO DA POSIÇÃO DAS SONDAS NO CANAL DE ONDAS NO LNEC	64
FIGURA 5.7. DOMÍNIO COMPUTACIONAL DO CASO DE ESTUDO.....	65
FIGURA 5.8. MALHA MODELADA PARA O CASO DE ESTUDO	66
FIGURA 5.9. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 A 8 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE)	70
FIGURA 5.10. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 9 E 10 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	71
FIGURA 5.11. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADE E DADOS EXPERIMENTAIS,	72
FIGURA 5.12. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 8 A 10 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	73
FIGURA 5.13. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6	74
FIGURA 5.14. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS,	75
FIGURA 5.15. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 E 7 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	77
FIGURA 5.16. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS,.....	78
FIGURA 5.17. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6.....	79
FIGURA 5.18. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 7 A 10 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	80
FIGURA 5.19. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 A 8 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	82
FIGURA 5.20. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 10.....	83
FIGURA 5.21. IMAGEM DA SIMULAÇÃO DA MELHOR PARIDADE COM OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	83
FIGURA 5.22. DESCONTINUIDADE DE SUPERFÍCIE LIVRE NA INTERFACE POROSO-NÃO POROSO.	84
FIGURA 5.23. REPRESENTAÇÃO DA ONDA INCIDENTE ANTES (CIMA) E DEPOIS (BAIXO) DA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	85
FIGURA 5.24. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6	87
FIGURA 5.25. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 7 A 10 (DE CIMA A BAIXO, RESPETIVAMENTE).....	88

FIGURA 5.26. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADES E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 11.....	89
FIGURA 5.27. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES POROSIDADES.....	89
FIGURA 5.28. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADE E DADOS EXPERIMENTAIS,	90
FIGURA 5.29. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADE E DADOS EXPERIMENTAIS,	91
FIGURA 5.30. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES POROSIDADES	92
FIGURA 5.31. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADE E DADOS EXPERIMENTAIS,	93
FIGURA 5.32. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES POROSIDADE E DADOS EXPERIMENTAIS,	94
FIGURA 5.33. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES POROSIDADES.....	94
FIGURA 5.34. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 E 7 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	96
FIGURA 5.35. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 8 A 11 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	97
FIGURA 5.36. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES β	98
FIGURA 5.37. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 A 8 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	99
FIGURA 5.38. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 9 A 11 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	100
FIGURA 5.39. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES β	100
FIGURA 5.40. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 A 9 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	102
FIGURA 5.41. COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES β E DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 10 E 11 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	103
FIGURA 5.42. COMPARAÇÃO DO VOLUME GALGADO POR METRO COM DIFERENTES β	103
FIGURA 5.43. COMPARAÇÃO OS RESULTADOS NUMÉRICOS COM OS DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 6 A 8 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).....	106
FIGURA 5.44. COMPARAÇÃO OS RESULTADOS NUMÉRICOS COM OS DADOS EXPERIMENTAIS, SONDA 9 A 11 (DE CIMA A BAIXO, RESPECTIVAMENTE).	107
FIGURA 5.45. VOLUME POR METRO GALGADO DIDIER AT AL. (2014).....	108
FIGURA 5.46. VOLUME POR METRO GALGADO, SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	108
FIGURA 5.47. PRIMEIRA ONDA INCIDENTE (CIMA) COM GALGAMENTO EXCESSIVO E TERCEIRA ONDA INCIDENTE (BAIXO) COM UM GALGAMENTO MAIS ATENUADO.....	109
FIGURA A1.1. ESQUEMA EM ÁRVORE DO CASO <i>OPENFOAM</i>	121

Índice de Tabelas

TABELA 2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO NO MEIO POROSO	23
TABELA 2.2. FORMULAÇÕES DOS COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA DIMENSIONAIS SEGUNDO VÁRIOS AUTORES (ADAPTADA DE ANDERSON & BURCHART, 1995)	24
TABELA 3.1. SOLVER UTILIZADOS NO <i>OPENFOAM</i>	30
TABELA 3.2. ESQUEMAS NUMÉRICOS UTILIZADOS NO <i>OPENFOAM</i>	31
TABELA 4.1. CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS EM ESTUDO	44
TABELA 4.2. POSIÇÃO DAS SONDAS AO LONGO DO CANAL	50
TABELA 4.3. PARÂMETROS DO MEIO POROSO DOS VÁRIOS MANTOS	51
TABELA 4.4. CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS EM ESTUDO	53
TABELA 5.1. AGITAÇÃO MARÍTIMA À ESCALA DE MODELO E PROTÓTIPO	64
TABELA 5.2. LOCALIZAÇÃO DAS SONDAS NO CANAL DE ONDAS DO LNEC	65
TABELA 5.3. VALORE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MEIO POROSO	68
TABELA 5.4. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO PRINCIPAL	70
TABELA 5.5. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO SECUNDÁRIO	72
TABELA 5.6. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO NÚCLEO	74
TABELA 5.7. VALORES OBTIDOS PARA A POROSIDADE DEPOIS DA CALIBRAÇÃO	76
TABELA 5.8. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO PRINCIPAL	77
TABELA 5.9. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO SECUNDÁRIO	79
TABELA 5.10. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO NÚCLEO	81
TABELA 5.11. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DO MEIO POROSO DEPOIS DA CALIBRAÇÃO	83
TABELA 5.12. VALORE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MEIO POROSO	86
TABELA 5.13. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO PRINCIPAL	87
TABELA 5.14. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO SECUNDÁRIO	90
TABELA 5.15. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO NÚCLEO	93
TABELA 5.16. VALORES OBTIDOS PARA A POROSIDADE DEPOIS DA CALIBRAÇÃO	95
TABELA 5.17. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO PRINCIPAL	96
TABELA 5.18. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO SECUNDÁRIO	99
TABELA 5.19. VALORES DOS PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO DE B DO NÚCLEO	101
TABELA 5.20. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DO MEIO POROSO DEPOIS DA CALIBRAÇÃO	104
TABELA 5.21. VALORES OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DO MEIO POROSO PELA CALIBRAÇÃO	106
TABELA 5.22. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA UMA ALTURA DE ONDA DE $H=3.3\text{M}$	108
TABELA A 2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO PRINCIPAL	122
TABELA A 2.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO MANTO SECUNDÁRIO	123
TABELA A 2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DA POROSIDADE DO NÚCLEO	123
TABELA A 2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO PRINCIPAL	124

TABELA A 2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DE B DO MANTO SECUNDÁRIO.....	124
TABELA A 2.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CALIBRAÇÃO DE B DO NÚCLEO	125

Nomenclatura

A	Amplitude da onda	[m]
A	Área de secção	[m^2]
C	Celeridade de onda	[m/s]
E_i	Energia da onda incidente	[J]
E_r	Energia da onda refletida	[J]
E_d	Energia da onda dissipada	[J]
E_t	Energia da onda transmitida	[J]
H	Altura de onda	[m]
H_s	Altura significativa	[m]
H/L	Declive da onda	-
I	Gradiente hidráulico	-
K	Permeabilidade	[m^2]
K_p	Coefficiente de permeabilidade	[m/s]
KC	Número de Keulegan-Carpenter	-
L	Comprimento de onda	[m]
L_0	Comprimento de onda em águas profundas	[m]
M_{50}	Peso médio da rocha	[kg]
P	Pressão	[Pa]
Q	Caudal volúmico	[m^3/s]
Re_p	Número de Reynolds	-
T	Periodo de onda	[s]
T_p	Periodo de pico	[s]
Um	Velocidade máxima de oscilação	[m/s]
U_p	Velocidade nos poros	[m/s]
a	Coefficiente dimensional linear do meio poroso	[s/m]
b	Coefficiente dimensional não linear do meio poroso	[s^2/m^2]

c	Coeficiente de resistência de inércia adimensional	$[s/m^2]$
d_{df}	Coeficiente de resistência adimensional do termo convectivo	$[1/s^2]$
d	Profundidade	$[m]$
d_{15}	Tamanho efetivo de grão (15% dos grãos são de diâmetro inferior)	$[m]$
d_{50}	Diâmetro médio do grão	$[m]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
k	Número de onda	$[1/m]$
n	Porosidade	-
n_{dados}	Número de dados experimentais	-
p_0	Pressão na interface do núcleo	$[Pa]$
\bar{p}	Média temporal da pressão	$[Pa]$
p'	Flutuação da pressão	$[Pa]$
r	Coefficiente de reflexão	-
u	Velocidade da componente horizontal	$[m/s]$
u_i	Vector de velocidade	$[m/s]$
\bar{u}	Média temporal da velocidade	$[m/s]$
u'	Flutuação da velocidade	$[m/s]$
u_i''	Flutuação espacial da velocidade	$[m/s]$
$\langle u_i \rangle^f$	Média volumétrica da velocidade	$[m/s]$
u_f	Velocidade de Darcy	$[m/s]$
u^r	Velocidade relativa	$[m/s]$
$\overline{u'_i u'_j}$	Tensor de Reynolds	$[m^2/s^2]$
v	Componente vertical da velocidade	$[m/s]$
v_c	Volume do volume de controlo	$[m^3]$
v_f	Volume do fluido ocupado no meio poroso	$[m^3]$
x_i	Vector no referencial cartesiano	-
x_n	Dados experimentais	-
\bar{x}	Média dos valores experimentais	-
y_n	Dados numéricos	-

α	Coeficiente de resistência linear adimensional	-
α_d	Declive da superfície do talude	-
α_{VOF}	Fracção de Volume	-
β	Coeficiente de resistência não linear adimensional	-
β'	Coeficiente de resistência oscilatório não linear adimensional	-
γ	Massa adicional	-
δ_a	Coeficiente de atenuação de pressão	-
δ_{ij}	Delta de kronecker	-
δ	Parâmetro de perturbação	-
ϵ	Taxa da energia dissipada	$[m^2/s^3]$
η	Elevação da superfície livre	$[m]$
κ	Energia cinética turbulenta	$[m^2/s^2]$
μ	Viscosidade dinâmica da água	$[pa\ s]$
ν	Viscosidade cinemática	$[m^2/s]$
ν_t	Viscosidade turbulenta	$[m^2/s]$
ξ	Número de Iribaren	-
ρ	Massa volúmica	$[kg/m^3]$
ρ_r	Massa volúmica da rocha	$[kg/m^3]$
Φ	Potencial da velocidade	-
ϕ	Propriedade física	-
ϕ_a	Propriedade física do ar	-
ϕ_f	Propriedade física do fluido	-
ω	Frequência angular	$[1/s]$

Abreviaturas e acrónimos

Bias	Enviesamento
CFD	Computacional Fluid Dynamics
IC	Índice de concordância
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos elementos finitos
MDF	Método de diferenças finitas
MP	Manto principal
MS	Manto secundário
MSi	Manto secundário interior
MULES	Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution,
MVF	Método de volumes finitos
N-S	Navier-Stokes
NMA	Nível Médio da Água
OF	OpenFOAM
PISO	Pressure implicit with splitting of operators
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Desvio padrão
SIMPLE	Semi-implicit method for pressure-linked equations
Swak4Foam	Swiss army knife for foam
K-E	Modelo de turbulência $k - \epsilon$
TOT	Todo o tamanho
VARANS	Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes
VC	Volume de Controle
VOF	Volume of Fluido
ZH	Zero hidráulico

1 Introdução

1.1 Motivação

O estudo da interação de ondas com quebra-mares porosos tem sido muito investigado com o intuito de melhorar o seu desempenho hidráulico. As obras marítimas de proteção costeira, como os quebra-mares, têm um papel fundamental no abrigo de zonas portuárias e de todas as construções costeiras. Basicamente, o quebra-mar tem a função de reduzir os efeitos da agitação marítima a sotamar da estrutura. O quebra-mar deve dissipar e refletir a energia da onda incidente na sua totalidade, impedindo a transmissão de energia para a área protegida a sotamar (Palmer & Christian, 1998). A conceção e construção de uma obra como um quebra-mar envolve custos avultados e enormes recursos físicos, materiais e humanos. Com o objetivo de construir uma proteção fiável, consistente e duradoura de zonas costeiras, é necessário uma projeto cuidadoso.

Até à data, o projeto de estruturas de proteção à agitação marítima, como é o caso do quebra-mar poroso, é feito com experiências físicas em canais e tanques de ondas ou seguindo formulações empíricas ou semi-empíricas (Higuera, 2015; Cavallo et al., 2012). As experiências são realizadas com modelos a escala reduzida, aceitando as implicações que o escalamento traduz, nomeadamente os efeitos de escala, para obter uma previsão dos fenómenos hidráulicos na interação onda-estrutura (Jensen et al. 2013). Na maioria dos casos não é possível realizar testes à escala real do protótipo, devido ao custo associado e à infraestrutura necessária. Apesar do recurso a modelos de escala, os custos associados às experiências continuam consideráveis. A complexidade do estudo e as infraestruturas necessárias tornam o estudo muito moroso e trabalhoso na preparação e na realização, tal como no processamento de dados. Ainda assim, são

de extrema importância para um projeto desta natureza e, neste momento, o meio mais frequente na previsão dos acontecimentos durante a interação onda-estrutura.

Com o desenvolvimento computacional e modelos matemáticos consistentes e acreditados, as simulações numéricas estão a ganhar uma grande importância na dinâmica dos Fluidos. A possibilidade de estudar praticamente todo tipo de escoamento recorrendo à aproximação Euleriana, em qual se fundamentam as equações de *Navier-Stokes* (N-S), tornam a aplicação de Mecânica de Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) na previsão de escoamento, muito atrativo. Adicionalmente, o aparecimento do método VOF (volume of fluid) em programas CFD, que captura a superfície livre com uma boa aproximação, permite às equações Navier-Stokes modelar escoamentos bifásicos. A extensão das equações N-S para as equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), ao permitir a modelação de escoamentos turbulentos, mostrou em várias validações a capacidade de modelar a propagação e os processos complexos de transformações de ondas sem o recurso a formulações empíricas (Lara et al., 2011; del Jesus et al., 2012).

O uso das equações RANS em problemas com meios porosos implica o uso de uma malha muito refinada, devido à necessidade de modelar a zona porosa na malha. As equações *Volume-Average Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (VARANS), apresentadas por Hsu et al. (2002), vieram dar uma opção fiável com a inclusão da formulação do escoamento no meio poroso. A implementação do meio poroso é feita de acordo com o modelo de *Darcy-Forchheimer*, modelando a zona porosa como um meio de maior resistência. As equações VARANS determinam o comportamento médio do escoamento no meio poroso e não o percurso exato, uma vez que esta aproximação é válida para a maior parte dos problemas de engenharia costeira. A implementação das equações VARANS em códigos numéricos CFD e a inclusão de condições de fronteira, que geram escoamento oscilatório, tornam o recurso à CFD cada vez mais apelativo para problemas de engenharia costeira. Destaque-se aqui os trabalhos de Jacobsen et al. (2012) (Waves2Foam), del Jesus et al. (2012) (IH2VOF) e Higuera et al. (2013) (IHFOAM).

A utilização de CFD em estudos de interação onda-estrutura permite uma análise pormenorizada dos fenómenos hidráulicos a barlar, sotamar e dentro do quebra-mar. É possível estudar a dissipação, reflexão e transmissão, tal como o galgamento da onda sem grandes infraestruturas, com custos mínimos, evitando formulações empíricas (Cavalo et al., 2012). O tempo de preparação da experiência numérica é muitas vezes mais baixo que no caso físico, deste modo o CFD pode ser muito útil no projeto de um quebra-mar poroso. O baixo custo e a diminuição do tempo necessário para realização dos ensaios, fazem com que o recurso

computacional seja uma alternativa às equações empíricas. No entanto, os ensaios físicos ainda são indispensáveis e os métodos computacionais um complemento às experiências. O aumento do número de pessoas que abordam problemas desta natureza com programas CFD para fins de validação, de estudo ou de projeto, permite aos investigadores melhorar o desempenho do código e aproximar o comportamento do escoamento simulado cada vez mais próximo da realidade.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação foi utilizado o código *OpenFOAM* (OF) para validar o *solver* IHFOAM, estudar a interação de ondas com quebra-mares porosos e para observar, entender e descrever os fenómenos hidrodinâmicos associados. Neste sentido, escolheu-se o quebra-mar poroso poente do porto de pesca de Albufeira do caso de estudo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Didier et al., 2013). De forma a dar consequência ao trabalho formularam-se os seguintes objetivos:

- Estudar o comportamento do escoamento com uma malha mista, estruturada fora do meio poroso e não estruturada no meio poroso para escoamentos oscilatórios (Secção 4.2).
- Estudar os efeitos dos parâmetros do meio poroso sobre o escoamento e determinar um método de calibração das várias camadas porosas do quebra-mar (Secção 5.4).
- Estudar e validar o código para determinação do volume galgado (Secção 5.5).
- Comparar e discutir os resultados com dados experimentais (Secção 5.4.4, 5.5.4 e 5.5.5).

1.3 Organização

Numa primeira parte deste trabalho, analisa-se o comportamento do código com malhas de diferentes tipos, estudando os efeitos de uma malha não estruturada no meio poroso em relação a uma malha estruturada. É ainda abordada a dependência do modelo de turbulência.

Numa segunda parte, são calibrados os parâmetros do meio poroso. Apresenta-se o método usado para a calibração dos parâmetros e são estudados os seus efeitos sobre o comportamento da estrutura. O estudo é realizado com duas alturas de ondas, uma altura de onda que não origina e uma altura de onda que origina galgamento. Foram colocadas várias sondas ao longo de um

canal de ondas que medem a elevação de superfície livre. Para os ensaios com galgamento, calculou-se a altura da água galgada e o volume galgado por metro de largura de parede, podendo assim estudar-se os efeitos dos parâmetros do meio poroso do quebra-mar sobre o galgamento. Os resultados obtidos numericamente são comparados com resultados obtidos em ensaios laboratoriais no LNEC (Didier et al., 2014).

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos: Introdução, Caracterização teórico-experimental, Código Numérico, Estudo da dependência da malha e do modelo de turbulência, Caso de Estudo: Interação de ondas com um quebra-mar poroso e Conclusões e trabalhos futuros.

No segundo capítulo é feita uma revisão sobre os fundamentos teóricos associados aos fenómenos da interação de ondas com quebra-mares porosos. Apresenta-se a geração e propagação de ondas e os modelos matemáticos que descrevem o movimento da onda. São ainda apresentados os fenómenos hidrodinâmicos durante a interação onda-estrutura e aborda-se o escoamento em meios porosos.

No terceiro capítulo são descritas as ferramentas utilizadas para efetuar as simulações neste trabalho. Descreve-se o código *OpenFOAM*, o solver utilizado (IHFOAM) e o modo como foi captado o galgamento com a ferramenta Swak4Foam. Neste capítulo ainda se apresentam os modelos matemáticos usados pelo *OpenFOAM* para as simulações efetuadas.

No quarto capítulo faz-se a análise da dependência de malha e do modelo de turbulência. São ainda discutidos os resultados obtidos.

No quinto capítulo são calibrados os parâmetros do meio poroso do quebra-mar Poente do porto de Pesca de Albufeira e analisados os efeitos sobre o escoamento. Este estudo é realizado com duas alturas de onda diferentes, com e sem galgamento.

No sexto capítulo são discutidos e analisados os resultados, apresentando-se as conclusões e trabalho futuro.

2 Caracterização teórico-experimental

Nesta Capitulo é feita uma revisão sobre os fundamentos teóricos associados aos fenómenos da interação de ondas com quebra-mares porosos, fundamentos estes necessários para a simulação numérica e para discussão de resultados.

São apresentados os conceitos básicos da formação e propagação de ondas marítimas (secção 2.1), tal como os modelos matemáticos que descrevem o movimento das ondas usados nas simulações. Neste sentido, são revistas a teoria de ondas linear de Airy (secção 2.2) e a teoria de ondas não linear de Stokes e o regime de aplicabilidade de ambas (secção 2.3).

Descrevem-se os fenómenos hidrodinâmicos durante a interação de ondas com quebra-mares porosos, tanto fora como dentro do quebra-mar poroso (secção 2.4). É explicada ainda a transposição de massa de água sobre o quebra-mar, o chamado galgamento (secção 2.4.1).

Introduz-se o escoamento no meio poroso e as aproximações usadas em CFD para a simulação deste tipo de escoamento (secção 2.5). Apresentam-se as formulações matemáticas que descrevem o escoamento no meio poroso implementadas no código numérico usadas nas simulações. Descrevem-se ainda os parâmetros do meio poroso utilizados nas formulações e os seus efeitos sobre o escoamento. Deste modo, divide-se o escoamento em dois tipos: o escoamento estacionário (secção 2.6.1) e o escoamento não estacionário (secção 2.6.2).

2.1 Agitação marítima

Com o objetivo de entender os fenômenos associados à interação de ondas com estruturas marítimas é necessário, em primeiro lugar, entender os conceitos mais básicos da formação e propagação de ondas marítimas.

As ondas marítimas são ondas mecânicas que transmitem energia através da água. A energia transferida pode ser transmitida pela interação do vento e das superfícies do mar, pela força gravítica da lua, por eventos sísmicos ou por deslocamento de placas tectónicas no fundo do oceano. As ondas geradas pelo vento são formadas pela interação do vento com a superfície da água. O vento perturba a superfície livre, provocando um aumento de rugosidade e formando, a partir deste aumento, as chamadas ondas capilares. Este tipo de onda tem como força restauradora a tensão superficial. Por sua vez, com a continuação da interação ar – água e com o aumento da rugosidade, que permite um aumento de transferência de energia do ar para a água, as ondas ganham amplitude, A , e formam-se, assim, ondas de gravidade. Estas ondas têm este nome devido ao facto que a força restauradora é a força gravitacional, já que a tensão superficial torna-se insignificante em relação à força gravitacional (Massel, 1996).

A continuação da transmissão de energia pelo vento para água permite que a onda se propague, aumente a altura, H , e o comprimento de onda, L . A relação H/L tem um valor máximo que limita a estabilidade da onda e inicia a sua rebentação. A rebentação é a forma mais evidente da dissipação da energia criada pelo vento e pela gravidade terrestre. A energia transmitida é também dissipada em águas pouco profundas, onde as ondas dissipam energia no fundo do mar, já que as partículas da água geram atrito com a superfície terrestre. Outro meio de dissipação de energia é passagem da onda por meios porosos, no qual a onda tem que vencer forças viscosas e de pressão. À medida que as ondas se aproximam da costa ou de regiões de menor profundidade, vão perdendo velocidade e comprimento, mas ganham altura, mantendo assim o período. Este efeito é chamado de empolamento (*wave shoaling*).

Em termos teóricos as ondas têm duas grandes categorias – as ondas regulares e as ondas irregulares. As ondas regulares são cadeias de ondas que têm características bem definidas, como amplitude e período, T , constantes; as ondas irregulares são cadeias de ondas onde cada onda tem diferentes períodos e amplitudes (Demirbilek & Vincent, 2002).

Os movimentos que as ondas de gravidade efetuam aproximam-se a movimentos oscilatórios. Entende-se então, que a descrição matemática do movimento da onda pode ser feita por uma onda

simples. Ondas simples são ondas sinusoidais, com uma certa periodicidade, com amplitude constante e um perfil bem definido. Este tipo de ondas são progressivas, ou seja, elas propagam-se horizontalmente com uma direção definida, a qual é denominada de direção de propagação. As ondas simples que se propagam sobre o fundo do mar horizontal, podem ser completamente definidas pela altura da onda, H , comprimento, L , e pelo seu período, T . De seguida, representam-se os parâmetros de uma onda simples progressiva que passa num ponto fixo (Dean & Dalrymple, 1991).

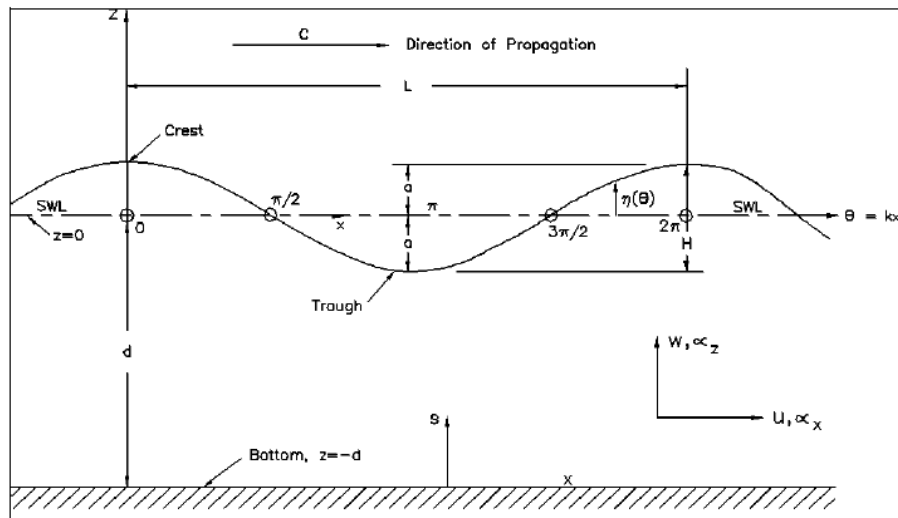


Figura 2.1. Parâmetros da onda (Demirbilek, Z & Vincent, C. L., 2002)

Na Figura 2.1 estão representados alguns parâmetros que permitem definir uma onda, mas há que ter em conta mais alguns parâmetros, como o número de ondas $k = 2\pi/L$ e a celeridade $C = L/T$. Ainda se devem conhecer os seguintes números adimensionais: o declive da onda $\epsilon = H/L$, a profundidade relativa d/L e a altura relativa H/d onde d é profundidade.

Quando se pretende analisar o comportamento de uma partícula de água é necessário ter em conta a profundidade, d . O efeito do fundo do mar influencia o percurso que uma partícula de água percorre. Em águas profundas ($d/L > 1/2$) uma partícula tem um movimento orbital circular e em águas rasas ($d/L < 1/20$) e em profundidade intermédia ($1/20 < d/L < 1/2$), o movimento é elíptico. Este efeito é gradual, não existindo uma passagem de águas profundas para águas rasas de forma repentina (Wiegel & Johnson, 1950). Em relação às órbitas da partícula, as

teorias das ondas variam. A teoria linear de Airy assume o movimento como uma órbita fechada sem que haja transporte de massa (Figura 2.2).

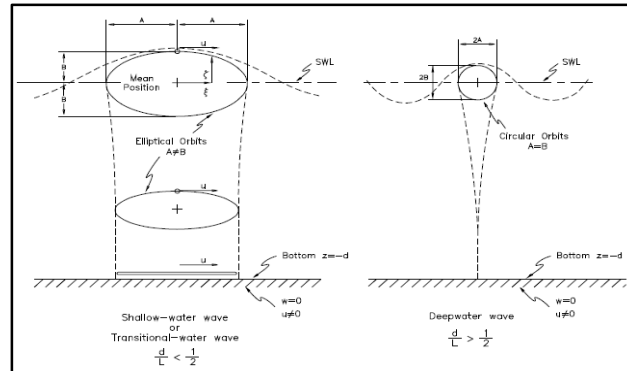


Figura 2.2. Órbita das partículas (Demirbilek & Vincent, 2002)

De acordo com a teoria de ondas de amplitude finita de Stokes (*Stokes finite-amplitude wave theory*) as órbitas não são fechadas e uma parcela de massa de água é transportada em direção da propagação da onda (Webb, 2013). Este transporte de massa é chamado de deriva de Stokes (*Stokes drift*) (Figura 2.3).



Figura 2.3. Deriva de Stokes (adaptado de Webb, 2013)

2.2 Teoria de ondas linear

A primeira aproximação matemática para a descrição do movimento de ondas gravitacionais foi feita por Airy (1841). A teoria linear das ondas ou também a teoria de ondas de pequena amplitude é a teoria mais elementar quando se pretende modelar matematicamente o comportamento de uma onda. Esta teoria é válida para ondas de pequena dimensão e águas

profundas. A teoria linear tem-se vindo a mostrar consistente na modelação deste tipo de onda e permite uma aplicação sem grande esforço. Mesmo assim tem as suas limitações e para a aplicação da teoria linear terão de ser tomadas em conta as seguintes suposições (Demirbilek & Vincent, 2002),

- O fluido é homogéneo e incompressível
- A tensão superficial e o efeito da aceleração de coriolis são desprezáveis
- A pressão à superfície livre é uniforme e constante
- O fluido é invíscido e ideal
- O escoamento é irrotacional, as forças de tensão são consideradas nulas
- O fundo é horizontal, fixo e impermeável
- O perfil da onda é constante e a amplitude da onda é pequena
- As ondas são bidimensionais

Respeitando as simplificações anteriores é possível obter os parâmetros das ondas, resolvendo as equações: de Laplace, da continuidade e de Bernoulli.

Ao assumir que o escoamento é irrotacional é possível utilizar a função matemática do potencial de velocidade, Φ . O escoamento de um fluido ideal incompressível e invíscido é governado pela equação de Laplace,

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad , \text{ com } u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \text{ e } v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad [2.1]$$

Então a equação da continuidade é satisfeita,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [2.2]$$

Onde u e v são as componentes da velocidade em x e y .

Adicionalmente, a equação de Bernoulli linearizada, sem o termo de segunda ordem,

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \quad [2.3]$$

Onde P é a pressão, g a aceleração da gravidade e ρ a massa volúmica.

Resolvendo estas equações, com a condição de fronteira da superfície livre e do fundo horizontal e aplicando as leis das equações diferenciais, determinam-se os parâmetros fundamentais do comportamento da onda (Dean & Dalrymple 1991). O perfil da onda, consoante a teoria linear, é descrita como uma sinusoidal simples que varia no tempo e no espaço,

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \text{sen}(kx - \omega t) \quad [2.4]$$

Onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular.

A velocidade de propagação da onda, ou a celeridade de onda, é representada da seguinte forma,

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \text{tanh}(kd)} \quad [2.5]$$

A frequência angular e o comprimento da onda são dados por,

$$\omega = \sqrt{gk \text{tanh}(kd)} \quad [2.6]$$

$$L = \frac{gT}{\omega} \text{tanh}(kd) \quad [2.7]$$

A velocidade da partícula pode ser obtida através da seguinte equação,

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \cos(\theta) ; w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \text{sen}(\theta) \quad [2.8]$$

Onde $\theta = kx - \omega t$.

Observando as equações anteriores, podemos facilmente entender que estas têm uma forte dependência da profundidade. Tendo isto em conta, variam as equações propostas por Airy consoante a profundidade relativa (Dean & Dalymple, 1991). Esta teoria é muito útil para descrever o movimento das ondas em águas profundas, mas na engenharia costeira é necessário recorrer a outras teorias que representam de forma mais correta o comportamento de ondas em águas menos profundas e que respeitam o transporte de massa (Figura 2.3).

2.3 Teoria de ondas não linear

A inclusão das duas teorias de ondas deve-se ao facto que nesta dissertação, para o caso em estudo, será usada a teoria de *Stokes* de ondas curtas, que é uma teoria de ondas não linear e é uma extensão da teoria de *Airy* de várias ordens. A forma mais simples da teoria de *Stokes* é a primeira ordem que é idêntica à teoria linear, mas a teoria de *Stokes* de ondas curtas pode ser estendida até a modelações matemáticas mais complexas de quinta ordem. Neste subcapítulo será apresentada, de forma muito breve e pouco aprofundada, a teoria de *Stokes* de segunda ordem, que foi usada no caso de estudo para a geração de ondas.

Quando as ondas aumentam de altura em relação a profundidade do mar ou quando estas se movimentam em direção à costa, são necessárias teorias de ondas de ordem maiores para poder descrever o comportamento da onda e os fenómenos associados. Na teoria linear, a amplitude da crista é igual à amplitude da cava, o que implica que a crista e cava viagem ao mesmo tempo e, assim, não exista transporte de massa, em contraste às teoria de ondas não lineares. Este facto permite que haja transporte de massa e que as orbitas não sejam fechadas (Sorensen, 2006).

Para obtenção das equações que descrevem o fenómeno da onda, é utilizada a expansão de potências pelo método da perturbação, utilizando o parâmetro $\delta = kA$ (parâmetro de perturbação). A solução linear (primerio termo da equação 2.9) não depende de δ , mas o segundo termo já depende.

$$\Phi = \Phi_1 + \delta\Phi_2 + \delta^2\Phi_3 + \dots \quad [2.9]$$

Onde Φ_1 é o potencial da velocidade da teoria linear e Φ_2 da segunda ordem, etc.

Segundo Dean & Dalrymple (1991) a dedução destas equações requer o recurso à adimensionalização dos parâmetros em estudo.

De forma a entender a relação entre a teoria de *Airy* e de *Stokes* de segunda ordem, apresenta-se aqui a elevação da onda, que é descrita da seguinte forma:

$$\eta(x, t) = \frac{h}{2} \text{sen}(kx - \omega t) + k \left(\frac{h}{2}\right)^2 \frac{1}{\tanh(kh)} \left(1 + \frac{3}{2\text{senh}^4(kd)}\right) \cos(2(kx - \omega t)) \quad [2.10]$$

Observa-se que o primeiro termo é idêntico à teoria linear. É importante referir que a velocidade de propagação da onda não se altera da primeira para a segunda ordem (Gil, 1999).

Quando se pretende aplicar uma teoria de ondas para um problema, é necessário ter em conta a profundidade, a altura da onda e o período. Le Méhauté (1976) fez um estudo rigoroso sobre os domínios de aplicação das diversas teorias e resumiu os resultados num gráfico que facilita a escolha da teoria de propagação de ondas gravíticas adequada. O gráfico, Figura 2.4, representado, obtido por Le Méhauté, é usado para identificar qual a teoria de ondas mais correta para o problema e esta foi usada nesta dissertação para esse fim.

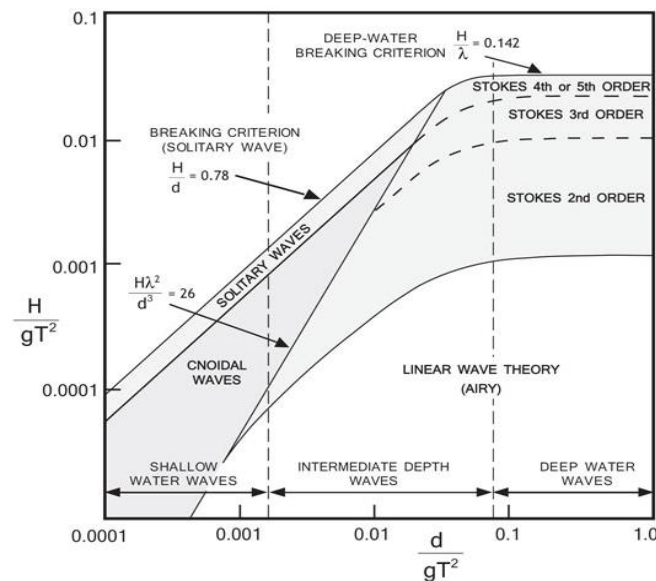


Figura 2.4. Teorias de ondas (LeMéhaute, 1976)

2.4 Interação de ondas com quebra-mares porosos

A interação de ondas com um quebra-mar poroso engloba os fenómenos da transformação, reflexão, dissipação e transmissão da onda. Neste sub-capítulo é feita uma descrição qualitativa dos eventos hidrodinâmicos deste tipo de problemas. Consoante Muttray (2000) é possível subdividir as regiões perto, dentro e longe do quebra-mar poroso em cinco zonas.

A primeira região é a zona desde o mar aberto até ao pé do quebra-mar; a segunda zona é do pé do quebra-mar até á superfície exterior do quebra-mar; a terceira é do pé até a berma mas dentro do quebra-mar; a quarta zona é o núcleo do quebra-mar e a quinta é a região a jusante do quebra-mar. A Figura 2.5 representa as cinco zonas.

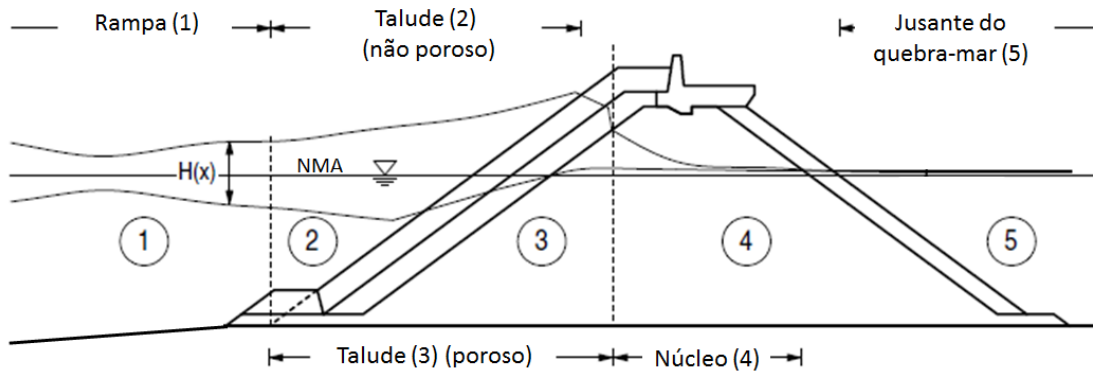


Figura 2.5. Representação das regiões do quebra-mar poroso (adaptado de Muttray, 2000)

Os fenómenos hidráulicos associados à interação das ondas com um quebra-mar serão detalhados com auxílio da Figura 2.5. Na primeira região, a onda sofre a primeira transformação. A onda que é gerada no alto mar e que se propaga acima de um fundo horizontal de grande profundidade em direção ao quebra-mar, inicia a subida da rampa aumentando a sua altura, reduzindo a sua velocidade e comprimento durante do empolamento (*wave shoaling*). Neste processo o período não é alterado (Hald, 1998). Perto do pé do quebra-mar pode ocorrer um campo de ondas quase-estacionário, ou seja, ocorre um *clapóti*s parcial onde os nodos oscilam em contraste à onda estacionária (Pipa, 2008). Este tipo de acontecimento está relacionado com o modo como as ondas são refletidas pela estrutura. As ondas quase estacionárias criam um tipo de oscilação de forma do *batimento* criando um envelope em torno dos máximos das ondas. A Figura 2.6 mostra o envelope de um *clapóti*s parcial.

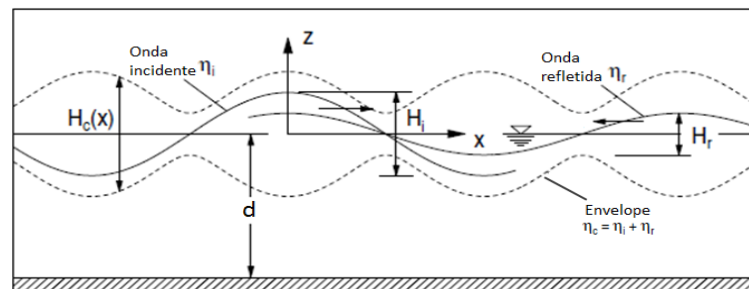


Figura 2.6. Clapóti parcial (adaptado de Muttray, 2000)

Isto resulta de uma reflexão incompleta, sendo que numa reflexão completa o nodo fica praticamente sem oscilação e só os ventres oscilam. A reflexão das ondas em quebra-mares de talude, normalmente não é completa devido ao declive do manto exterior e à sua característica porosa.

Na zona 2, entre o manto exterior e o pé do talude, ocorrem vários fenómenos. Os mais visíveis são o espraçamento, o refluxo e rebentação da onda no manto exterior e o galgamento sobre o quebra-mar. O processo do espraçamento e do refluxo retiram energia ao escoamento devido ao atrito entre a água e o manto. Este processo em ondas regulares é simétrico em relação ao NMA (Nível média da água) em quebra-mares verticais. Adicionalmente na zona 2 existe dissipação da energia em forma da rebentação, existe transmissão de energia para o interior do quebra-mar e existe reflexão da onda incidente.

Essencialmente, a energia da onda incidente pode ser dividida em 3 partes: a energia dissipada, a energia refletida e a energia transmitida (Oumeraci & Partenscky, 1990).

$$E_i = E_r + E_d + E_t \quad [2.11]$$

Onde E_i é a energia da onda incidente, E_r , E_d e E_t são as energias refletida, dissipada e transmitida, respectivamente. A E_t divide-se na energia transmitida pelo interior do quebra-mar e pela energia transmitida pelo galgamento.

A rebentação é o fenómeno mais óbvio da perda de energia da onda e depende do declive da onda e do declive da superfície ou da estrutura (neste caso do quebra-mar). Irribarren (1949) apresentou o número de Irribarren que define a forma da rebentação da onda, dependendo do declive da superfície exterior do quebra-mar e do declive da onda (Battjes, 1974).

$$\xi = \frac{tg(\alpha_d)}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad [2.12]$$

Onde L_0 é o comprimento da onda em águas profundas, α_d é o declive da superfície exterior do quebra-mar e H a altura da onda.

Battjes (1974) afirma que a reflexão de onda depende diretamente do processo de rebentação e da energia dissipada neste processo e apresenta então um coeficiente de reflexão, r , baseado no número de Irribarren.

$$r = 0.1\xi^2 \quad [2.13]$$

Esta aproximação é válida para uma superfície impermeável e sem galgamento, mas torna-se inviável em superfícies porosas. Foram vários autores que estudaram estes fenómenos da

rebentação e da reflexão e Van Der Meer fez depender o número de Iribaren da porosidade e assim também o coeficiente de reflexão (Muttray, 2000).

$$\xi = K_p^{-0.08} \frac{tg^{0.62}(\alpha_d)}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.46}} \quad e \quad r = 0.07\xi \quad [2.14]$$

Onde K_p é o coeficiente de permeabilidade. A relação apresentada de Van Der Meer mostra que a reflexão e rebentação da onda são fortemente influenciadas pelo declive e pela porosidade do manto exterior.

A transmissão e a altura da onda transmitida não têm uma forte dependência do declive, mas são influenciadas pelas porosidades de todos os mantos do quebra-mar. A energia transmitida é toda a energia que não é refletida ou dissipada e em quebra-mares porosos existem duas formas de transmissão de energia da onda incidente de montante para jusante. O galgamento sobre o quebra-mar depende da geometria, das características do meio poroso e dos parâmetros da onda incidente. Outra forma de transmissão de energia da onda é a transmissão da onda para a camada de filtro que depende da porosidade dos mantos exteriores e interiores, da onda e da largura do quebra-mar. Na zona 2 (Figura 2.5) onda incidente sofre uma deformação muito grande devido às ondas refletidas pela estrutura que se propaga em direção à onda incidente, somando-se a esta e alterando o seu perfil e a altura como já foi referido. Então, pode-se afirmar que as características da zona porosa e da geometria têm uma ação importante sobre as ondas incidentes.

No núcleo (zona 4, na Figura 2.5) a onda vai perdendo altura devido à resistência oferecida pelo meio poroso. A maior elevação ocorre no lado da onda incidente e diminui exponencialmente ao longo do núcleo. A Figura 2.7 mostra a perda da altura da onda dentro de um meio poroso, sem efeitos dos limites do meio. Dependendo dos parâmetros do meio poroso (porosidade, tamanho e forma de grão) e da onda, a energia dissipada no núcleo é mais ou menos intensa. A onda pode dissipar energia por atrito ou por efeitos dinâmicos nomeadamente por turbulências (secção 2.6 para uma explicação mais aprofundada sobre escoamento em meio poroso).

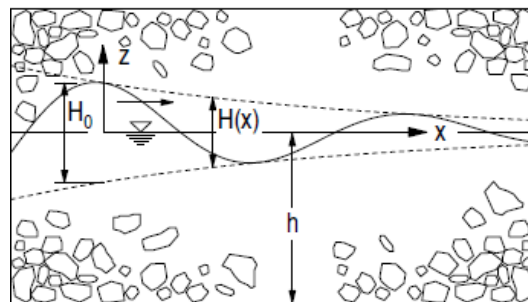


Figura 2.7. Atenuação da altura da onda no meio poroso (adaptado de Muttray, 2000)

Biesel (1950) realizou um estudo teórico sobre escoamento oscilatório em meios porosos e descreveu a atenuação da pressão nos poros de forma linear. Biesel entendeu que com a determinação da pressão é possível descrever o escoamento interno do meio poroso. Le Mehaute (1958) estendeu este trabalho para quebra-mares porosos, introduzindo a porosidade do meio e os efeitos inerciais. Em 1990, Oumeraci & Partensky apresentaram uma relação exponencial da atenuação da pressão nos poros, introduzindo um fator de atenuação.

$$p(x) = p_0 e^{-\delta_a \frac{2\pi}{L} x} \quad [2.15]$$

Onde p_0 é a pressão na interface da núcleo, x o comprimento do núcleo e L' o comprimento da onda dentro do quebra-mar e δ_a é o coeficiente de atenuação da pressão.

Oumeraci & Partensky (1990), sugerem $\delta_a=2$ que decresce com a profundidade e que depende da altura da onda. Troch em 2000 (adaptado de Mellink, 2012) apresenta um coeficiente de atenuação dependente da porosidade

$$\delta_a = a_\delta \frac{\sqrt{n}L^2}{H_s b}, a_\delta = 0.014 \quad [2.16]$$

Onde b é o comprimento do núcleo e H_s é a altura significativa.

No interior do quebra-mar, abaixo dos mantos exteriores, ou seja, na zona 3, ocorrem escoamentos muito complexos e pouco estudados. Muttray (2000) fez um estudo experimental sobre os fenômenos hidrodinâmicos nesta zona do quebra-mar e observou que na superfície exterior do manto principal o escoamento é principalmente paralelo ao manto. A infiltração pelo manto exterior ocorre, usualmente, perpendicular à superfície exterior durante o espraiamento. Durante o refluxo acontece o oposto, a descida da onda na superfície exterior provoca uma depressão na camada de filtro e na interface a barlar do núcleo, criando um escoamento em direção à onda incidente. A saída da água do interior do quebra-mar ocorre principalmente perpendicular à interface entre as camadas no pé da estrutura. Adicionalmente, é introduzido ar abaixo da superfície da água durante estes processos de entrada e saída de massa de água no quebra-mar, o que pode aumentar a resistência hidráulica do meio poroso.

Muttray observou que o espraiamento diminui com o aumento da porosidade e quanto maior o espraiamento, maior a infiltração. Uma elevação muito grande sobre a estrutura provoca fortes gradientes de pressão sobre as camadas e descontinuidades da superfície livre entre as camadas do quebra-mar.

A sotamar do quebra-mar, na zona 5, ocorre a propagação de onda transmitida devido ao galgamento sobre a estrutura ou pelo interior do quebra-mar. O problema é a falta de eficácia da estrutura. Idealmente, não deveria existir transmissão das ondas para o interior da zona protegida pela estrutura. A transmissibilidade do quebra-mar poroso depende da geometria e das características do meio poroso. A equação 2.11 mostra que a transmissão depende da capacidade do quebra-mar refletir e dissipar a altura e assim a energia da onda, na sua superfície ou no seu interior.

2.4.1 Galgamento

Uma das formas de transmitir energia de barlar para sotamar da estrutura é a transposição de massa de água sobre o coroamento da estrutura. Este fenómeno é chamado galgamento (Figura 2.8) e torna-se muito importante no projeto de estruturas marítimas com fins protetores.

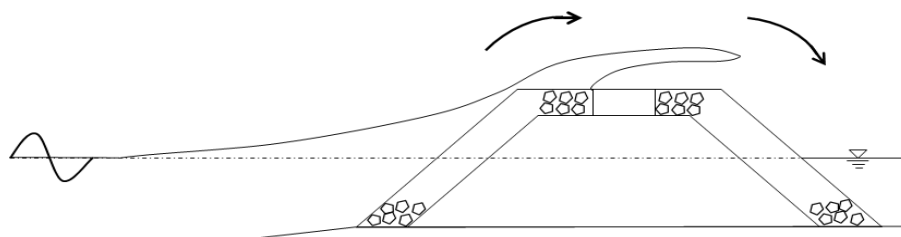


Figura 2.8. Esquema representativo do galgamento

O galgamento depende de vários fatores, desde as características das ondas até à geometria e às características do quebra-mar. Quando o talude tem um declive muito acentuado ou quando a cota de coroamento não é suficiente para a agitação marítima, ocorre este fenómeno. Sempre que a energia da onda não é totalmente dissipada na superfície ou refletida ou transmitida pelo núcleo do quebra-mar, o espraçamento excede a cota de coroamento e a massa de água transpõe o quebra-mar. A previsão do galgamento é muitas vezes feita por formulações empíricas, que determinam o volume galgado por metro [m^3/m] ou o caudal por metro [$(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$] a partir da geometria da estrutura e dos parâmetros da onda. Mas a simulação computacional está a ganhar uma maior importância no estudo do galgamento, o qual é estudado neste trabalho.

Existem três tipos de galgamento – o *green water*, o *splash* e o *spray*. A classificação é feita consoante o volume galgado, sendo o *splash* a definição para um galgamento resultante do impacto da onda sobre o manto exterior e a consequente massa galgada sobre o coroamento. É chamado *spray* à massa de água borrifada sobre o coroamento, que resulta da ação do vento sobre a superfície da água. A forma mais intensa do galgamento é a chamada *green water* e caracteriza-se pela passagem contínua da água sobre o coroamento. Em taludes, o *green water* resulta, maioritariamente, devido a espraamentos excessivos em contraste com o *splash* que resulta de declives pouco acentuados (EuroTop, 2007).

2.5 Escoamento no meio poroso

O escoamento no interior do meio poroso é muito complexo e torna-se assim muito complicada a sua representação analítica. No meio poroso, o fluido passa entre os elementos (grão, rochas etc.), sendo influenciado pelas características do meio poroso e do próprio escoamento. Na Mecânica de Fluidos Computacional com códigos que recorrem a aproximação de Euler é possível aproximar o escoamento no meio poroso de duas formas – a primeira é a simulação do escoamento em torno de cada elemento do meio poroso no domínio de estudo e a segunda forma é não determinar o exato comportamento do fluido entre os elementos, mas sim dar importância ao comportamento médio do escoamento dentro do meio poroso, alterando as equações governantes do escoamento nesta zona do domínio.

A primeira aproximação consiste na criação de cada elemento do meio poroso na malha, o que é muito moroso e trabalhoso, tendo uma grande dificuldade na criação de malha. É muito complicado e quase impossível perceber a forma correta e o arranjo de cada elemento do meio poroso. Existe uma forte relação entre a resistência oferecida ao escoamento e o arranjo do meio poroso, a forma dos seus elementos e a orientação dos grãos ou pedras. Outro problema deste método é a geração da malha, que terá de ser muito refinada, com muitas células, para que seja possível captar todo o comportamento do fluido entre os elementos, o que aumenta fortemente o tempo de cálculo. Adicionalmente, existem problemas com a qualidade de malha, nomeadamente no que diz respeito à ortogonalidade e ao rácio entre os lados da célula, o que cria uma deformação dos elementos e introduz erros numéricos adicionais. Esta aproximação pode ser feita em alguns casos onde é importante entender o escoamento entre os elementos ou em casos onde a geometria dos elementos do meio poroso é simples e conhecida.

A segunda aproximação e aplicada neste trabalho consiste na introdução de uma perda de carga adicional na zona porosa, alterando assim o comportamento do escoamento. A presença dos elementos do meio poroso (grão, rochas, etc.) é interpretada e modelada como uma resistência ao escoamento, onde o escoamento dissipa energia. Este método não determina o caminho exato do fluido entre os elementos, mas é obtido o comportamento do escoamento em média. Isto facilita muito a geometria da malha, reduzindo o tempo da criação desta, diminuindo o número de células do domínio e reduzindo assim o tempo de cálculo. Como na engenharia marítima não é muito relevante o comportamento exato do fluido no interior do meio poroso, é perfeitamente aceitável esta aproximação média do seu comportamento, permitindo obter os efeitos do meio poroso sobre o escoamento na sua globalidade. Neste ponto é importante referir que o escoamento é fortemente dependente do tempo, devido à ondulação do mar, e que é necessária a introdução da resistência relativamente ao escoamento ondulatório.

2.6 Formulação do meio poroso

2.6.1 Escoamento Estacionário

A primeira formulação matemática do escoamento por um meio poroso foi apresentada por Darcy (1856). Enquanto experimentava com uma coluna de areia, Darcy observou uma relação linear entre a perda de pressão e a velocidade do escoamento. O estudo foi realizado com um número de Reynolds baixo no regime laminar e com escoamento estacionário de um fluido incompressível num meio poroso homogêneo.

A formulação obtida é conhecida como a Lei de Darcy:

$$Q = \frac{-KA}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad [2.17]$$

Onde Q [m^3/s] é o caudal do escoamento, A [m^2] é a área de seção, K [m^2] é a permeabilidade e μ [Pa s] o coeficiente de viscosidade dinâmica.

A equação 2.17 reformulada demonstra a relação linear entre a velocidade do escoamento e a perda de pressão:

$$u_f = \frac{-K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad [2.18]$$

Onde u_f [m/s] é a velocidade de Darcy ou velocidade superficial.

A velocidade de Darcy, u_f , é a velocidade média do escoamento que passa o meio poroso e não representa a velocidade exata nos espaços vazios e define-se de seguinte forma:

$$u_f = u \times n \quad [2.19]$$

Onde $n = V_p/V_t$ é a porosidade do meio, V_p o volume dos poros, V_t o volume total, u [m/s] é a velocidade real do fluxo no interior do meio poroso.

Introduzindo o gradiente hidráulico, $I = -\frac{dp}{dx} \left(\frac{1}{g\rho} \right)$, na equação 2.19 obtém-se um coeficiente dimensional, a (s/m) (Melink, 2012). Este coeficiente contabiliza a perda de carga por atrito e as características do meio poroso, incluindo a porosidade e o seu arranjo. O coeficiente de resistência linear tem que ser calibrado, já que depende das propriedades do meio poroso e da viscosidade do fluido (Van Gent 1995). Assim o gradiente hidráulico é definido da seguinte forma,

$$I = a \times u_f \quad [2.20]$$

Onde a [s/m] é o coeficiente de resistência linear.

O trabalho de Darcy permitiu assim definir com uma certa precisão o escoamento laminar por um meio poroso, mas torna-se impreciso com escoamentos de alta velocidade como demonstrou Forchheimer (1901).

Forchheimer realizou experiências com escoamentos estacionários de alta velocidade e observou que a variação da velocidade do escoamento não se comportava de forma proporcional ao gradiente hidráulico e propôs uma extensão à equação de Darcy, adicionando um termo não linear, redefinindo o gradiente hidráulico:

$$I = au_f + bu_f|u_f| \quad [2.21]$$

Onde b [s²/m²] é o coeficiente de resistência não linear.

O termo linear, a , (eq.2.21) contabiliza a parte laminar do escoamento e o termo quadrático, b , a parte inercial e turbulenta. O termo não linear, b , (eq.2.21) tem de ser calibrado empiricamente, como acontece com o termo linear. Durante o escoamento em regime laminar, predominam as forças viscosas do escoamento e à medida que a velocidade aumenta, as forças inerciais tornam-se cada vez mais importantes, introduzindo perdas de carga adicionais ao escoamento. A não linearidade entre a perda de pressão e a velocidade deve-se às forças inerciais e não ao aparecimento de vórtices turbulentos (Bear, 1972). Estas ocorrem em regimes de Reynolds mais elevados, já havendo uma não linearidade entre a velocidade e perda de carga.

Como referido anteriormente, o coeficiente linear depende da viscosidade, enquanto o coeficiente não linear não depende. Interessante aqui é a afirmação de Burcharth & Christensen (1991) que observaram certos problemas de formulação da equação de Forchheimer em regimes de transição e propuseram que os coeficientes a e b , tivessem valores diferentes, consoante o regime de escoamento (Figura 2.9). A Figura 2.9 demonstra que a transição do regime laminar para o regime turbulento ocorre de uma forma contínua em meios porosos e não de forma repentina como acontece num escoamento em condutas (Moody, 1944).

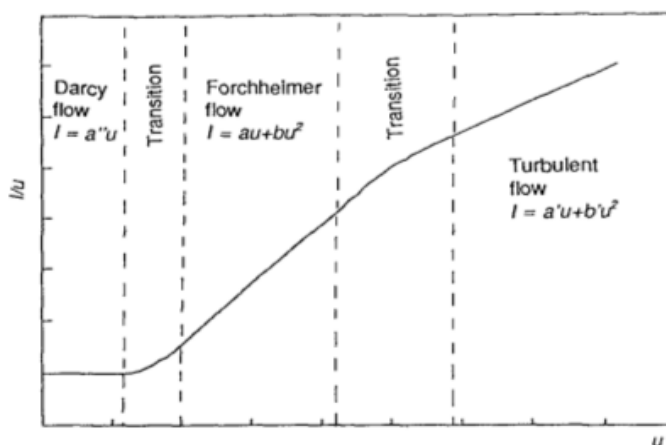


Figura 2.9. Representação das regiões de escoamento no meio poroso (Burcharth & Christensen, 1991)

Visto que os coeficientes de resistência linear e não linear dependem do regime do escoamento, é de extrema importância entender como são definidos os limites dos regimes e como é definido o número de Reynolds no meio poroso. Dybbs & Edwards (1984) definiram à base de experiências com modelos físicos, as fronteiras dos diferentes regimes de escoamento no meio poroso consoante o número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais com as forças viscosas.

O número de Reynolds no meio poroso depende do tamanho do grão, da porosidade e da velocidade nos poros. Dybbs & Edwards definiram os números de Reynolds relacionados com os tamanhos dos poros.

$$Re_p = \frac{u_p d_p \rho}{\mu} \quad [2.22]$$

Onde d_p é o diâmetro do poro e u_p é a velocidade nos poros

Em Burchart & Andersen (1995), são resumidos os quatro regimes de escoamento em meios porosos apresentados por Dybbs & Edwards (1984).

1. Regime de Darcy
2. Regime de Forchheimer
3. Regime de transição
4. Regime totalmente turbulento

O regime de Darcy, $Re_p \leq 1$, é caracterizado pela predominância das forças viscosas e com a variação linear do gradiente de pressão com a velocidade do escoamento. O regime de Forchheimer é chamado regime inercial e inicia-se com Re_p entre 1 e 10 e mantém-se até $Re_p=150$. Com o aumento do Re_p as camadas limites em torno dos grãos começam a desenvolver-se e as forças inerciais tornam-se cada vez mais importantes em relação às viscosas. O escoamento perde energia ao contornar os grãos (Bear, 1972). Neste regime, o escoamento mantém-se laminar (Figura 2.10), mas a relação entre a queda de pressão e a velocidade são não lineares.

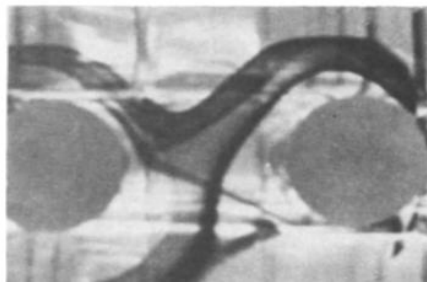


Figura 2.10. Escoamento em meio poroso com $Re_p=86$ (Dybbs & Edwards, 1984).

Para número de Reynolds de aproximadamente 150 a 300, ocorrem oscilações da esteira em alguns poros, demonstrando um escoamento não estacionário (Figura 2.11). Estas oscilações das esteiras iniciam a transição do regime laminar estacionário para o regime totalmente turbulento e não estacionário (Dybbs & Edwards, 1984). O escoamento tende a passar de laminar para

turbulento neste regime. Bear (1972) refere ainda que em meios porosos heterogêneos as turbulências ocorrem mais cedo em vazios maiores e mantendo-se laminar nos poros mais pequenos.

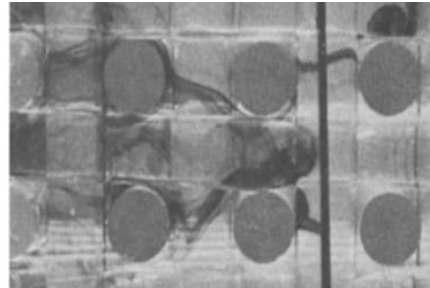


Figura 2.11. Escoamento em meio poroso com $Re_p=225$ (Dybbs & Edwards, 1984).

O regime totalmente turbulento inicia-se acima de $Re_p=300$, o escoamento é totalmente caótico e dominado pela turbulência (Figura 2.12) com grandes perdas de pressão associadas.

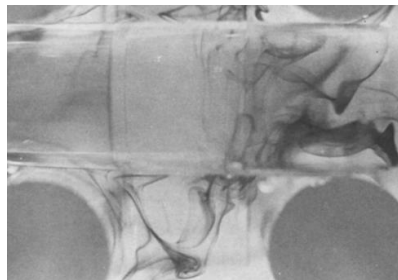


Figura 2.12. Escoamento em meio poroso com $Re_p=305$ (Dybbs & Edwards, 1984).

A Tabela 2.1 resume os regimes de escoamento em meios porosos e as equações válidas para cada regime. É importante referir que a constante, a' , no regime totalmente turbulento só serve para ajuste da equação e não tem qualquer significado físico (Figura 2.9).

Tabela 2.1. Classificação dos regimes de escoamento no meio poroso

Regime	Reynolds (Re_p)	Equação (Figura 2.9)
Darcy	$Re_p < 1$ a 10	$I = a''uf$
Forchheimer	1 a $10 < Re_p < 150$	$I = a'uf + b'uf^2$
Transição	$150 < Re_p < 300$	
Totalmente turbulento	$300 < Re_p$	$I = a'uf + b'uf^2$

Como o gradiente hidráulico depende do regime do escoamento, da porosidade, do tamanho e do arranjo dos grãos, é preciso definir os coeficientes a e b da equação 2.21, consoante estes critérios. Os coeficientes de resistência foram alvo de vários estudos de diversos autores ao longo dos anos e estão disponíveis na literatura. Os autores determinaram a e b empiricamente ou semi-empiricamente, um resumo é feito por Bear (1972). A Tabela 2.2 adaptada de Burchart & Andersen (1995) e complementada representa os coeficientes de resistência propostos por vários autores.

Tabela 2.2. Formulações dos coeficientes de resistência dimensionais segundo vários autores (adaptada de Burchart & Andersen, 1995)

Autores	a	b
Kozeny (1927)	$36k \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd^2}, k = 5$	-
Ergun (1952)	$150 \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd^2}$	$1.75 \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd^2}$
Engelund (1953)	$\alpha \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{v}{gd^2}$	$\beta \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd}$
Koenders (1985)	$\alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd_{15}^2}$	$\beta \frac{1}{n^5} \frac{1}{gd_{15}}$
Den Abel (1987)	$\alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd_{15}^2}$	$\beta \frac{1}{n^2} \frac{1}{gd_{15}}$
Shih (1990)	$\alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd_{15}^2}$	$\beta \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd_{15}}$
Van Gent (1992)	$\alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd_{50}^2}$	$\beta \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd_{50}}$

Onde d_{50} é o diâmetro médio do grão, d_{15} tamanho efetivo de grão (15% dos grãos são de diâmetro inferior), α e β são os coeficientes adimensionais linear e quadrático.

O α e o β têm de ser determinados empiricamente ou com base de conhecimento prévio das características do escoamento e das propriedades do meio poroso. A heterogeneidade do meio poroso, as diferentes formas das rochas, a superfície variada, o arranjo e o alinhamento das rochas, obrigam à calibração destes coeficientes para cada caso em estudo.

2.6.2 Escoamento não estacionário

A equação de Forchheimer é válida para o escoamento estacionário e foi estendida para escoamento não estacionário por Polubarinova-Kochina (1952). Polubarinova-Kochina adicionou um termo dependente do tempo, tornando a equação válida para regimes transitórios. Esta equação é conhecida como a equação de Darcy-Forchheimer estendida,

$$I = au_f + bu_f^2 + c \frac{du_f}{dt} + d_{df} u_f \frac{du_f}{dx} \quad [2.23]$$

Onde c é um coeficiente dimensional $[s/m^2]$ e $d_{df} = 1/n^2 g$ é o coeficiente que inclui o transporte convectivo.

O termo, c , contabiliza o momento linear adicional necessário para acelerar um volume de água num escoamento não estacionário no meio poroso (Van Gent, 1992). Este efeito é denominado de massa adicional (Brennen, 1982), já que o momento linear adicional faz parecer que está a ser acelerado um volume maior do que realmente está a ser. Solitt & Cross (1972) apresentaram uma solução para o coeficiente inercial, c , incluindo a porosidade. Esta ideia foi desenvolvida por vários autores ao longo dos anos (Burchart & Andersen, 1995). Van Gent (1992) derivou uma formulação para, c , incluindo a massa adicional e a porosidade:

$$c = \frac{1 + \gamma \frac{(1-n)}{n}}{ng} \quad [2.24]$$

Onde γ é a massa adicional e determinada empiricamente por Van Gent 1995, sugerindo um valor de 0.34.

Van Gent (1993) demonstrou experimentalmente que os coeficientes α e β são diferentes para escoamento estacionário e não estacionário. O coeficiente β depende do número adimensional de Keulegan-Carpenter, KC , que relaciona as forças de arrasto com as forças inerciais e permite entender o quão estacionário é o escoamento, maior o KC mais estacionário é o escoamento:

$$KC = \frac{U_m T_p}{n d_{50}} \quad [2.25]$$

Onde U_m é a velocidade máxima de oscilação e T_p o período de pico.

O coeficiente quadrático β não estacionário pode ser dividido em duas partes, uma parte estacionária e uma oscilatória, fazendo depender o “ β oscilatório” do KC , a Figura 2.13 representa o β e o β oscilatório em função do KC .

$$\beta_{Nest} = \beta_{est} \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \quad [2.26]$$

Onde β_{Nest} é coeficiente quadrático β não estacionário e β_{est} estacionário.

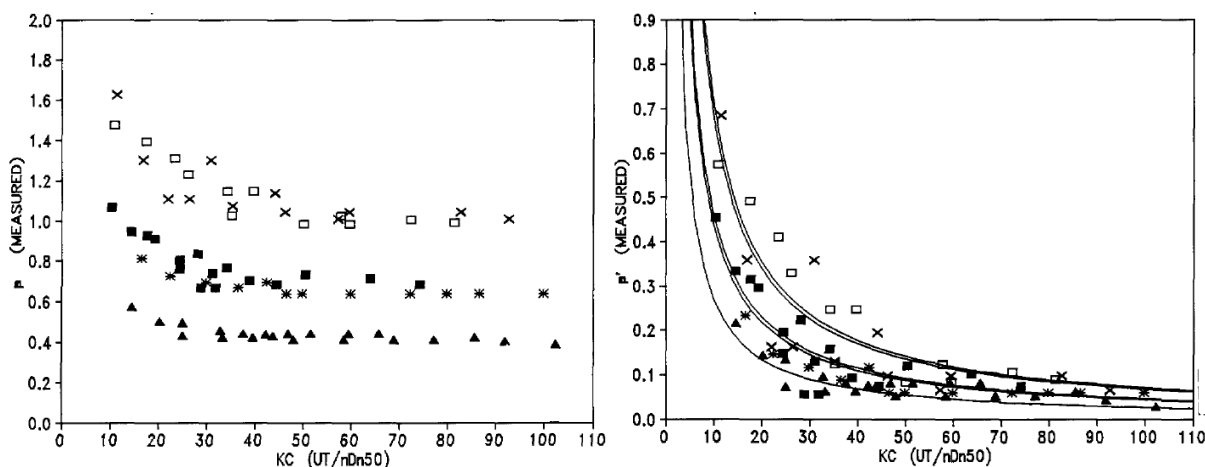


Figura 2.13. Representação de β em função do KC , β estacionário (esq.), β oscilatório (dir.) (Van Gent, 1995)

Consoante os gráficos (3) obtidos experimentalmente por Van Gent (1995), que analisou vários tipos de materiais, desde pedras irregulares a esferas com vários números de KC em regime estacionário e oscilatório para o coeficiente, β e β' , entende-se que o coeficiente de resistência torna-se constante com o aumento do KC . O que indica que o β é menor para KC maiores e que as forças inerciais tornam-se importantes em regimes oscilatórios, já que é necessária uma força adicional para mudar o movimento do fluido em zonas porosas, para conseguir romper as camadas limites (Bear, 1972).

Entende-se ainda que o coeficiente de resistência quadrático depende da porosidade do meio poroso, do diâmetro médio, da superfície, da forma do grão e do período e da velocidade do escoamento, sendo todos estes parâmetros importantes para a calibração do coeficiente não linear.

3 Código Numérico

No presente capítulo é apresentado o programa de simulação numérica utilizado – o *OpenFOAM* e as ferramentas usadas de pré- e pós-processamento. Adicionalmente, descreve-se o método de discretização usado pelo *OpenFOAM*, tal como os esquemas numéricos e os algoritmos de resolução aplicados nas simulações desta dissertação (secção 3.1). É apresentado o *solver* usado – o *IHFOAM*, o qual é um *solver* que permite resolver problemas com escoamento bifásico no meio poroso com geração de ondas (secção 3.2). São apresentados os modelos matemáticos, aos quais o *IHFOAM* recorre para descrever o movimento do escoamento de superfície livre fora e dentro do meio poroso (secção 3.4). Ainda se apresenta a ferramenta de manipulação e extração de dados – o *Swak4Foam*, que se utilizou para a determinação do volume galgado (secção 3.3).

3.1 OpenFOAM

OpenFOAM (OpenCFD, 2015) é um programa de simulação numérica correntemente utilizado no sistema operativo *Linux*, que permite resolver problemas de mecânica de fluidos, transmissão de calor, mecânica dos sólidos e electromagnéticos. O programa *OpenFOAM* é um programa de código aberto (*OpenSource*), o que significa que o código está disponível gratuitamente na internet e que o utilizador tem a liberdade de o manipular, de forma a atingir os seus objetivos. Esta liberdade de ação torna este *software* muito útil para o estudo de diversas áreas de Engenharia e da Ciência.

OpenFOAM é uma biblioteca em linguagem de programação C++ e é usada para criar executáveis e 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 (OpenCFD - User Guide, 2015)

O programa vem equipado com ferramentas de pré- e pós-processamento, mas toda a introdução e extração de dados é feita sem interface gráfica, o que dificulta a sua utilização, sendo necessário investir muito tempo para aprender a sua aplicação. As operações descritas são feitas com base em ficheiros e pastas que depois são “chamados” pelo *solver* e pelas *utilities* (no Anexo 1 encontra-se uma árvore da estrutura do *OpenFOAM* para o caso em estudo). Adicionalmente é preciso ter um conhecimento mais aprofundado do problema e do funcionamento do programa e ter ainda noções básicas de C++.

A informação para o uso deste *software* é obtida no *user guide* de *OpenFOAM*, na internet em fóruns como o *cfD-online* (CFD online, 2015) por troca de informação com outros utilizadores ou no *unofficial OpenFOAM Wiki* (Unofficial OpenFOAM Wiki, 2015), onde se encontra informação e tutoriais de forma a facilitar a aprendizagem.

O *OpenFOAM* inclui uma ferramenta que permite a geração de malhas e da geometria – o *blockMesh* – mas este programa não tem interface gráfica, o que dificulta a sua utilização. Para a geração de malhas podem ser utilizados outros geradores que permitem uma visualização durante o processo de geração de malhas e da geometria, sendo posteriormente importadas para o *OpenFOAM*. Neste trabalho, a malha foi gerada no *Gmsh* (Geuzaine e Remacle, 2009), o qual é um gerador de malha gratuito para Windows e Linux. No *Gmsh*, o utilizador pode gerar a malha, usando o interface gráfico ou com a linguagem de programação *Gmsh*, em formato de ficheiros de texto. O pós-processamento pode ser feito pelo *Paraview* (ParaView, 2015) para visualizar o comportamento do fluido. A análise de dados foi feita com o *QtiPlot* (QtiPlot, 2015), que é um *software* livre multiplataforma para análise gráfica e de dados. Ainda foi utilizado o *QtOctave* (QtOctave, 2015) para facilitar a manipulação de dados em pós-processamento, usando a linguagem de *MatLab*.

Para a realização desta dissertação foi utilizada a versão 2.2.2 do *OpenFOAM* no sistema operativo *Ubuntu 14.04 Lts*. Foi utilizado nas simulações um computador com um processador Intel® Core™ i7 950 @ 3.07GHz com 8GB RAM. Cada simulação da secção 5.4 demorou aproximadamente 25 horas e cada simulação da secção 5.5 demorou em média 33 horas, o que representa 29 periodos de onda em média.

3.1.1 Métodos de discretização

A aplicação de métodos numéricos a problemas de mecânica de fluidos implica a necessidade de discretizar o domínio em estudo. Os métodos de discretização mais usados são o método de volumes finitos (MVF), o método dos elementos finitos (MEF) e o método de diferenças finitas (MDF) e todos permitem obter a mesma aproximação à solução, caso a malha seja muito refinada (Gonçalves, 2007). O método de discretização usado pelo *OpenFOAM* é o MVF, tendo a vantagem de se adaptar a malhas estruturadas e malhas não estruturadas.

O princípio do MVF é a divisão do domínio em vários volumes de controle (VC) discretos, que não se sobrepõem e que cada volumes de controle tenha um nó no seu centro. No centroide do VC são guardadas as variáveis e as constantes das equações. As equações governantes são integradas em cada um dos volumes de controle. As variáveis são calculadas no centro do VC e as variáveis das faces do volume de controle são interpolados a partir do centro do VC.

O MVF é aplicável a todos os problemas CFD e é correntemente o mais usado. Uma das razões é o sentido físico de recorrer a volumes de controle e integrando as equações de transporte garantindo uma conservação das quantias (Versteeg & Malalasekera 1995; Patankar, 1980).

3.1.2 Esquemas numéricos e algoritmos de resolução

No presente subcapítulo são descritos os esquemas de discretização, de interpolação e de resolução utilizados pelo *OpenFOAM* usados nas simulações dos capítulos 4 e 5. Os esquemas de interpolação e os esquemas de discretização são introduzidos e definidos no ficheiro *fvschemes* (Tabela 3.2) e os algoritmos de resolução no ficheiro *fvsolution* (Tabela 3.1) que se encontram na pasta *system* (Anexo 1). No ficheiro *fvschemes* define-se os esquemas de discretização e de interpolação para cada termo das equações governantes. No ficheiro *fvsolution* define-se os algoritmos de resolução para cada variável das equações governantes.

O esquema de discretização utilizado neste trabalho é a MVF (secção 3.1.1). As variáveis são determinadas nas faces do volume de controle a partir da interpolação das variáveis conhecidas nos centros dos VC. Os esquemas de interpolação utilizados no *OpenFOAM* efetuam esta interpolação, dependendo do termo a interpolar, podem ser aplicados esquemas de interpolação

de primeira ordem ou de ordem superior e podem ser limitados ou não. Na tabela 3.2 estão representados todos os esquemas numéricos usados nesta dissertação.

O recurso a métodos numéricos implica o recurso a métodos iterativos com um determinado critério de paragem, chamados algoritmos iterativos. Estes algoritmos permitem resolver o sistema das equações algébricas garantindo uma boa aproximação e convergência. No presente trabalho, foi usado o algoritmo PIMPLE, que é composto pelo algoritmo SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*) (Patankar, 1980) e pelo PISO (*pressure implicit with splitting of operators*) (Jasak, 1996). O PIMPLE inicia-se com uma estimativa do campo de pressão (*guessed pressure-field*) e determina estimativas dos componentes da velocidade. Depois o algoritmo corrige-os até os resíduos atingirem o valor estipulado. Os algoritmos recorrem aos algoritmos de resolução de equações lineares (*linear solver*) para resolver cada uma das equações discretizadas. Os algoritmos definidos para os ensaios referidos para u, p, k e ϵ , estão resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. *Solver* utilizados no *OpenFOAM*

	<i>Linear solver</i>	Características
-Velocidade, u -Energia cinética turbulenta, k -Taxa de dissipação de energia, ϵ	PBiCG (Precondicionated Bi-Conjugate Gradient)	Resolve matrizes assimétricas
	Preconditioner	
	DILU (Diagonal incomplete-LU)	Resolve matrizes assimétricas
	Tolerância	$1e^{-3}$
	Fator de relaxamento	0
-Pressão, $p_{\rho gh}$	<i>Linear solver</i>	
	PCG (<i>Preconditioned Conjugate Gradient</i>)	Resolve matrizes assimétricas
	Preconditioner	
	DIC (<i>Diagonal Incomplete-Cholesky</i>)	Resolve equações assimétricas
	Tolerância	$1e^{-6}$
	Fator de relaxamento	0

Tabela 3.2. Esquemas numéricos utilizados no *OpenFOAM*

Derivada temporal $\partial/\partial t$ (ddtScheme, no OF)		
Discretização	Descrição do esquema	
Euler	Primeira ordem, limitado, implícito	
Gradiente (termo difusivo) ∇ (gradScheme, no OF)		
Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Gauss	Linear	Segunda ordem, interpolação linear
Divergente (termo convectivo) $\nabla \cdot$ (divScheme, no OF)		
Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Gauss	Linear	Segunda ordem, interpolação linear
Gauss	LimitedLinearV 1	Primeira ordem, limitado
Gauss	VanLeer	Primeira ordem, limitado
Gauss	InterfaceCompression	Primeira ordem, limitado
Gauss	Upwind	Primeira ordem, limitado
Laplaciano ∇^2 (laplacianSchemes, no OF)		
Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Gauss	Linear corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo
Gradiente normal à superfície (snGradSchemes, no OF)		
Discretização	Descrição do esquema	
Corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo, com correção não-ortogonal	

3.2 IHFoam

O *solver* utilizado nesta dissertação é o *IHFoam* (IHFOAM, 2015), que permite resolver problemas bifásicos com geração de ondas e zonas porosas. Este *solver* foi adaptado de um outro *solver* já existente no *OpenFOAM*, o *InterFoam*. O *IHFoam* resolve as equações VARANS (*Volume Averaged Reynolds Averaged Navier Stokes*) para dois fluidos incompressíveis e imiscíveis com zona porosa. Em estudos sem a zona porosa, o *solver* recorre ao *InterFoam*, que resolve as equações RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*). A superfície livre é identificada pelo método de *Volume of Fluid* (VOF) e permite ainda a introdução de vários modelos de turbulência $k - \epsilon$, $k - \omega$, SST e LES (Higuera et al., 2013).

O *IHFOAM* contém todas as utilidades do *InterFoam* e permite ainda a geração de ondas regulares e irregulares consoante várias teorias de ondas. As teorias de ondas implementadas são: a teoria de Stokes de primeira, segunda e de quinta ordem; *cnoidal*; *Stream function wave theory*; *Solitary waves*; ondas irregulares; gerador de ondas de pistão (*piston wavemaker*). Todas as teorias de ondas usadas pelo *IHFOAM* introduzem um perfil não uniforme à fronteira do domínio, sendo geradores estáticos, ou seja, é aplicada uma velocidade horizontal e vertical à água, em contraste com o gerador de ondas (*piston wavemaker*) que é um batedor do tipo pistão e que introduz um perfil de velocidade uniforme à água (Higuera, 2015).

O *solver* usa a absorção ativa da onda para impedir que as ondas refletidas na estrutura ou nos limites do domínio computacional influenciem a onda gerada na fronteira de geração. Sempre que uma onda refletida atinge o batedor estático, ele responde com uma onda em anti-fase, de forma anular a onda incidente sobre o batedor. Desta forma, evita-se que a onda refletida da estrutura volte a refletir no batedor e que a onda gerada se some à onda refletida no batedor. O *IHFOAM* permite a absorção e geração em simultâneo na fronteira de entrada. Adicionalmente, permite a aplicação de fronteiras dinâmicas que absorvem a onda por deformação de malha nas fronteiras.

O tratamento da zona porosa é feita com a formulação de Van Gent (1992) em regime transitório e de Engelund (1953) em regime estacionário (Tabela 2.2). O *IHFOAM* permite a utilização de várias zonas porosas de geometria e localizações diferentes com porosidade, tamanho de grão e com coeficiente de resistência diferentes, tornando-se uma ferramenta ideal para o uso em estudos numéricos com quebra-mares porosos e da engenharia costeira.

O *IHFOAM* utiliza o mesmo tratamento da superfície livre que o *InterFoam*, usando o método VOF. Este método utiliza uma variável, a fração de volume, que varia entre 1 e 0 consoante a quantidade existente de água na cela, 1 se for somente água, 0 se for o ar e entre 1 e 0 se for a interface entre ar e água. Logo, entende-se que a interface é uma gama de valores entre 1 e 0 e que é necessário limitar o indicador da fração de volume, α , algo que se mostrou difícil e é necessário aplicar uma compressão artificial (Rusche, 2002 e Medina, 2008). Este termo da compressão artificial (Eq. 3.18) é somado à equação de transporte e só fica ativo na região da superfície. Para obter uma interface o mais fina possível e bem definida, foi desenvolvido o método limitador multidimensional universal para solução explícita (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*, MULES) (OpenCFDa, 2015).

3.3 Swak4Foam

O swak4Foam (*swiss army knife for foam*) (Swak4Foam Wiki, 2015) é um conjunto de bibliotecas e *utilities* que permitem vários tipos de introdução, manipulações e extração de dados, sem ser necessário reprogramar ou criar um *solver* ou uma *utility*. A ferramenta tem a possibilidade de definir condições de fronteira e campos de vectores ou escalares por equações no domínio completo ou em zonas definidas do domínio. Permite ao utilizador definir expressões para a extração de dados em certos pontos do domínio, depois e durante o cálculo. Nesta dissertação usaram-se duas bibliotecas do swak4foam.

Foram usadas as bibliotecas *swakFunctionObjets* e a *simpleSwakFunctionObjects*, em simultâneo, para a determinação do volume de água galgado e o caudal médio galgado.

3.3.1 Captura do caudal galgado

O galgamento foi determinado recorrendo às bibliotecas *swakFunctionObjets* e a *simpleSwakFunctionObjects* do Swak4foam. A medição foi feita em tempo de cálculo e não em pós-processamento, devido à velocidade a que ocorre o galgamento. O intervalo de escrita é de 25Hz, o que não pode ser suficiente para determinar a massa de água que transpõe a estrutura (Jacobsen, 2015a). Como o passo de tempo é variável e limitado pelo número de Courant igual a 0.45 ao calcular o caudal em cada passo de tempo, garante-se que o caudal galgado seja sempre captado. O tempo de cálculo aumenta com o passo de tempo variável, já que é necessária a leitura e a escrita do caudal a cada passo de tempo. Para determinar o caudal da água galgado, foi criado uma *faceZone* e uma *slaveCellset*, na qual o caudal é medido (Figura 3.1). A *faceZone* é um conjunto de faces definidas no domínio, neste caso, na zona central acima do bloco de cimento. As *slaveCells* são as células a montante da *faceZone* e a função destas células é indicar a orientação do vector normal à secção e permitir que se possa *retirar* informação do nó do seu interior, como é o caso da fração de volume, da pressão e da velocidade. O caudal é uma variável calculada na superfície, o que implica que o valor seja *gravado* na face da cada célula, mas a fração de volume é um escalar de volume gravado no centro da célula. Como o α_{VOF} foi usado como *if condition*, é necessário recorrer às *slaveCells*. Foi criada uma condição de $\alpha_{VOF} > 0.5$ (no *OpenFOAM* α_{VOF} é designado de *alpha 1*) para a medição do caudal, ou seja, sempre que a fração de volume nas *slaveCells* é maior que 0.5 o caudal é medido, garantindo assim que apenas

se mede o caudal de água e não o caudal do ar. Adicionalmente, para melhores resultados, multiplica-se o caudal determinado com o α_{VOF} , isto porque as *slaveCells* com $0.5 < \alpha_{VOF} < 1$ contêm ar e água e apenas é necessário obter o caudal da água nestas células.

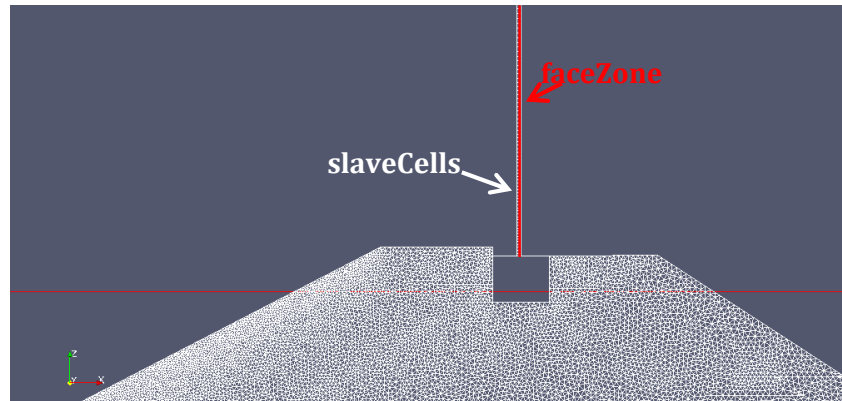


Figura 3.1. Representação das células usadas na captura do galgamento

3.4 Modelos matemáticos

Nesta secção apresentam-se as equações VARANS e como são obtidas apartir das equações Navier-Stokes, passando pelas equações RANS e também é feita uma referência ao método VOF. Apresentam-se ainda as equações do modelo de turbulência utilizado no caso em estudo no capítulo 5, o modelo de turbulência $k - \epsilon$.

3.4.1 Equações VARANS

Nas simulações efectuadas ao longo do trabalho, é considerado um escoamento bidimensional de um fluido Newtoniano e incompressível em regime turbulento e em meio poroso. Para a descrição matemática deste tipo de escoamento aplicam-se as equações VARANS. As equações VARANS são baseadas nas equações RANS, as quais descrevem o movimento de um fluido newtoniano e incompressível em regime turbulento e são obtidas com a aplicação da decomposição de Reynolds às equações Navier-Stokes (N-S) (del Jesus et al, 2012). As equações são apresentadas progressivamente neste subcapítulo.

As equações de Navier-Stokes para um fluido Newtoniano e incompressível são constituídas pelas equações de conservação de massa (Eq.3.1) e de quantidade de movimento (Eq.3.2).

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [3.1]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad [3.2]$$

Onde u_i é o vetor da velocidade, p é pressão, ρ a massa volúmica do fluido e ν é a viscosidade cinemática.

As equações de Navier-Stokes permitem uma aproximação rigorosa ao escoamento de um fluido em regime laminar. Para escoamento em regime turbulento é preciso incorporar os efeitos turbulentos nas equações. Uma das características do escoamento turbulento é o aparecimento das vorticidades de forma aleatória, que introduz uma flutuação na velocidade do escoamento. Como já referido a consideração das flutuações da velocidade e da pressão pode ser feita por intermédio da decomposição de Reynolds, que considera que a velocidade e a pressão são constituídos por um valor médio mais uma flutuação (Veersteg & Malalasekera, 1995),

$$u_i = \bar{u} + u_i' \quad [3.3]$$

$$p = \bar{p} + p' \quad [3.4]$$

Onde \bar{u} e \bar{p} são a suas médias temporais e u' e p' representa a flutuação da velocidade e da pressão no tempo.

Aplica-se agora a decomposição de Reynolds (Eq.3.3 e 3.4) à equação de conservação de massa (Eq.3.1) e à equação de conservação de quantidade de movimento (Eq.3.2), seguindo as regras para médias temporais (Versteeg & Malalasekera 1995).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad [3.5]$$

E a equação de conservação de quantidade de movimento toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad [3.6]$$

Comparando a Eq.3.2 e Eq.3.6, entende-se que as equações são muito semelhantes exceto o termo $\overline{u'_i u'_j}$ e que os termos da equação estão na forma de médias temporais.

O termo adicional que aparece aplicando as médias temporais nas equações Navier-Stokes é considerado como as contribuições da turbulência no escoamento. Este termo é chamado tensor de Reynolds. O problema é que este termo implica que as equações RANS não podem ser resolvidas, tendo mais incógnitas que equações, e é necessário modelar este termo. É neste ponto que os modelos de turbulência são aplicados. Os termos das flutuações da velocidade provêm do termo convectivo, mas associa-se que o tensor de Reynolds ao das tensões viscosas.

Sendo a forma mais simples de modelar o tensor de Reynolds como um termo viscoso (uma viscosidade artificial) adicional, introduzindo a viscosidade turbulenta, ν_t :

$$\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \quad [3.7]$$

Boussineq (1877) propôs a hipótese de relacionar o tensor de Reynolds com o campo médio de deformações (Versteeg & Malalasekera, 1995) e apresentou uma nova variável – a energia cinética turbulenta, que representa a energia da flutuação turbulenta, $k = \frac{1}{2}(u_i'^2)$.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad [3.8]$$

Onde δ_{ij} é o delta de kronecker (matriz identidade)

Nesta dissertação foi utilizado o modelo de turbulência $k - \epsilon$ (K-E) que modela o tensor de Reynolds. O k representa a energia cinética turbulenta e o ϵ a taxa da energia dissipada. Este modelo utiliza duas equações de transporte para k e para ϵ , (Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad [3.9]$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad [3.10]$$

Onde a viscosidade turbulenta ν_t é definida como,

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad [3.11]$$

Onde C_μ uma constante adimensional da viscosidade que toma o valor de 0.09. Falta referir que os coeficientes das equações de transporte de k e ϵ são sugeridas por Lara (2008), para problemas hidrodinâmicos.

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad [3.12]$$

As equações RANS permitem determinar o movimento do escoamento turbulento. Ao escoamento em meios porosos poderiam ser aplicadas as equações RANS, só que seria necessária a modelação da zona porosa na malha (*criação dos grão etc.*) e uma malha muito densa. De forma a poder usar as equações RANS ao meio poroso, aplicam-se as médias volumétricas às equações RANS. Esta transformação segue a linha descrita anteriormente, aplicando uma média espacial as equações RANS obtendo, desta forma, as equações VARANS. As equações VARANS determinam o escoamento médio no meio poroso sem respeitar o percurso exato do escoamento (Figura 3.2).

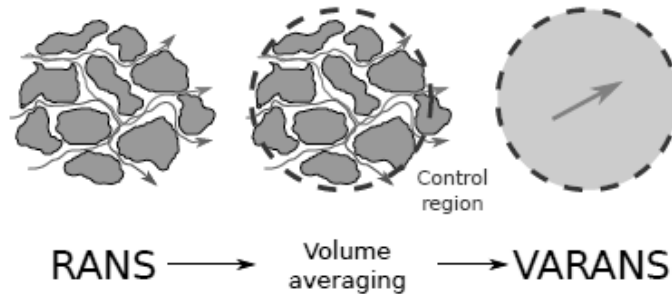


Figura 3.2. Representação do fundamento das VARANS (Higuera, 2015)

Para aplicar a média volumétrica, considera-se um volume de controlo maior que os poros. Isto quer dizer que a média é feita sobre o volume ocupado pelo fluido, v_f , no meio poroso num certo volume de controlo, V_c . A velocidade decomposta por média volumétrica, as flutuação temporais e as flutuações espaciais da velocidade, tomando a seguinte forma:

$$u_i = \langle u_i \rangle^f + u_i' + u_i'' \quad [3.13]$$

Onde $\langle u_i \rangle^f = \frac{1}{v_f} \int_{v_f} u_i dV$ é a média volumétrica e u_i'' é a flutuação espacial da velocidade.

Sabendo que o volume do fluido ocupado no volume do controlo depende da porosidade do volume de controlo ($v_f/V_c = n$, sendo n a porosidade) pode-se relacionar a média volumétrica nos poros com a média volumétrica no volume de controlo

$$\langle u_i \rangle = n \langle u_i \rangle^f \quad [3.14]$$

Onde $\langle u_i \rangle = \frac{1}{v_c} \int_{v_c} u_i dV$ é a velocidade média no volume de controlo.

Ao aplicar as regras para efetuar o *volume-averaging*, obtém-se as equações VARANS. Este processo é perecido ao método da média temporal, mas o aumento número de equações aumenta fortemente a complexidade da aplicação (Higuera, 2015). As equações de conservação de massa e da quantidade de movimento tomam a seguintes formas, respetivamente:

$$\frac{\partial n \langle u_i \rangle^f}{\partial x_i} = 0 \quad [3.15]$$

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{n} \rho \langle u_j \rangle \right] = -n \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle^f}{\partial x_i} + \rho n g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho v \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \right] + I \quad [3.16]$$

Onde I representa o gradiente hidráulico do meio poroso modeladas pela fórmula de Darcy-Forchheimer (Eq.2.23) com a formulação de Van Gent (1995) os coeficientes de resistência não linear e a formulação de Englund (1953) para o coeficiente linear a (Tabela 2.2), e o coeficiente inercial c toma o valor sugerido por Van Gent $c = 0.34$, assim o termo I fica:

$$I = \alpha \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} u_i + \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^2} \frac{\rho}{D_{50}} |u_i| u_i + 0.34 \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} \quad [3.17]$$

O *IHFOAM* é um *solver* VARANS para duas fases; falta ainda adicionar as equações do método VOF, de forma a determinar a superfície livre e as propriedades do fluido.

3.4.2 Método VOF

O método VOF (Volume Of Fluid) (Hirt & Nicols, 1981) é um método implementado no *OpenFOAM* para determinar a superfície livre. Existem vários métodos de captura da superfície livre, mas o VOF tem a vantagem de ser facilmente implementável e não envolver a deformação da malha.

Este método utiliza uma equação de transporte para determinar a fração de volume, α_{VOF} , presente em cada elemento da malha. O α_{VOF} é uma função indicadora que indica o volume ocupado por um fluido numa célula, sendo $\alpha_{VOF} = 1$ se a célula estiver preenchida de fluido e $\alpha_{VOF} = 0$ se a célula só contiver ar. O α_{VOF} toma valores entre 0 e 1, sempre que existam duas fases numa célula. A definição da superfície livre é feita por uma gama de valores entre duas células e onde $\alpha_{VOF} = 0.5$ define a superfície livre.

O movimento do fluido é descrito por uma equação de transporte para a fração de volume com um termo de compressão artificial para limitar o valor de α_{VOF} entre 0 e 1.

$$\frac{\partial \alpha_{VOF}}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{1}{n} \frac{\partial \alpha_{VOF}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\alpha_{VOF} (1 - \alpha_{VOF}) \langle u_i^r \rangle] = 0 \quad [3.18]$$

Onde $\langle u^r \rangle = \langle u^f \rangle - \langle u^a \rangle$ representa a velocidade relativa; o terceiro termo é o termo de compressão artificial que permite manter o α_{VOF} entre 0 e 1 (Medina, 2008). O segundo termo já contabiliza a porosidade existente na célula.

As propriedades físicas do escoamento são determinadas com a fração de volume em cada célula:

$$\phi = \alpha_{VOF} \phi_f + (1 - \alpha_{VOF}) \phi_a \quad [3.19]$$

Onde ϕ representa a propriedade física (e.g a viscosidade μ e a massa volúmica ρ), ϕ_f é a propriedade do fluido e ϕ_a propriedade do ar.

4 Estudo da dependência da malha e modelo de turbulência

O estudo da dependência da malha foi realizada de forma a entender os efeitos do refinamento e do tipo de malha sobre o escoamento fora e dentro do meio poroso. Para este fim efetuaram-se dois estudos. Numa primeira fase, estudou-se o caso clássico de Lin (1998), a ruptura de uma coluna de água no meio poroso com dois refinamentos e dois tipos de malha diferentes. Numa segunda fase, estudou-se a importância do tipo de malha na zona porosa do quebra-mar, sobre o escoamento oscilatório da água. Estudou-se ainda a dependência da superfície livre simulada face ao modelo de turbulência escolhido.

Visou-se comparar os tipos de malha utilizados na simulação com dados experimentais, validando o código e verificar os efeitos das malhas sobre escoamento no meio poroso. Adicionalmente, pretendeu-se diminuir o tempo de cálculo, o tempo de construção e de geração de malha.

A necessidade de testar duas malhas de diferentes refinamentos deve-se ao facto que com um refinamento menos densa, o tempo de cálculo é menor, mas são introduzidos maiores erros de discretização. A utilização de uma malha triangular e não estruturada diminui o tempo de criação de malha, mas uma qualidade de malha inferior introduz erros de arredondamento e aumenta o tempo de cálculo. É importante encontrar um equilíbrio entre o tempo dispensado na construção da malha e o tempo de cálculo, garantindo assim a qualidade dos resultados obtidos. A dependência do modelo de turbulência foi estudada para se entender a sua importância sobre o escoamento e para avaliar a sua necessidade neste tipo de problemas.

4.1 Rutura de coluna de água no meio poroso

A experiência de Lin (1998) é um estudo bidimensional e muito usado para este tipo de estudo, devido à sua simplicidade e ao fato de permitir a análise da superfície livre, dentro e fora da zona porosa. Lin analisou a queda de uma coluna de água por dois tipos de meios porosos, mas neste trabalho apenas apresentam-se os resultados de um dos casos. As experiências realizaram-se dentro de um tanque de vidro com 0.89 m de comprimento, 0.44 m de largura e 0.58 m de altura. Inicialmente, a coluna de água está limitada em dois lados, de um lado pelo vidro do tanque e do outro lado por uma porta móvel, separando a água do meio poroso, tal como representado na Figura 4.1. É mantido um nível de água mínimo de 0.025 m em todo o tanque, diminuindo os efeitos de atrito no fundo do tanque. Na simulação a altura da coluna de água é de 0.35 m e o meio poroso foi simulado por pedras irregulares com 0.0159 m de diâmetro médio.

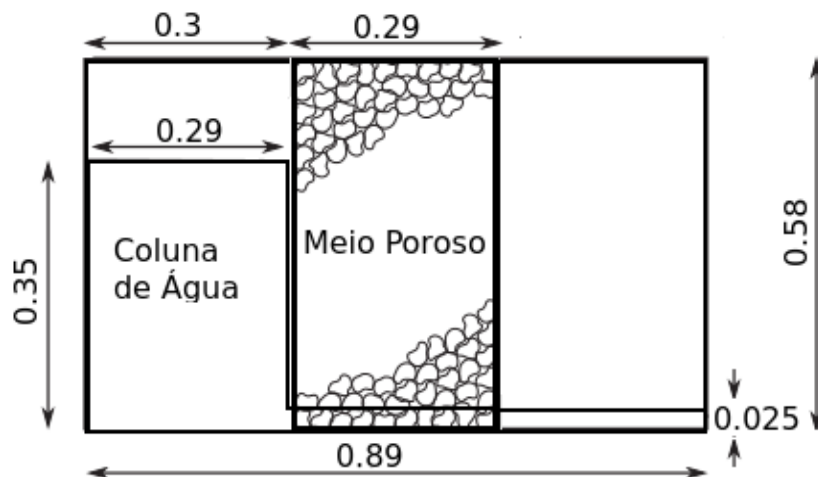


Figura 4.1. Domínio do tanque em estudo com a condição inicial (dimensões em metros)

4.1.1 Condições de simulação

O domínio de estudo é bidimensional e foi considerado o tanque no seu todo. Foram realizados quatro ensaios, mantendo o nível da coluna de água e o diâmetro dos grãos do meio poroso. Seguiram-se as recomendações de Higuera (2015) e também de Jensen et al. (2013), para os coeficientes de resistência linear quadrático e para a massa adicional foi seguida a recomendação de Van Gent (1995).

Em todos os ensaios manteu-se constante a porosidade de 0.49, o diâmetro nominal dos grãos de 15.9 mm, o coeficiente linear, α , igual a 100, o coeficiente não linear, β , igual a 2 e a massa adicional, γ , é considerada 0.34. A densidade e a viscosidade da água e do ar são constantes com valores de: $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{ar}} = 1 \text{ kg/m}^3$ e $\nu_{\text{água}} = 1 \text{ e}^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu_{\text{ar}} = 1,48 \text{ e}^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Higuera, 2013a) e usadas em todos os estudos neste trabalho. Variou-se o refinamento e o tipo de malha; as malhas utilizadas estão representadas na Figura 4.2.

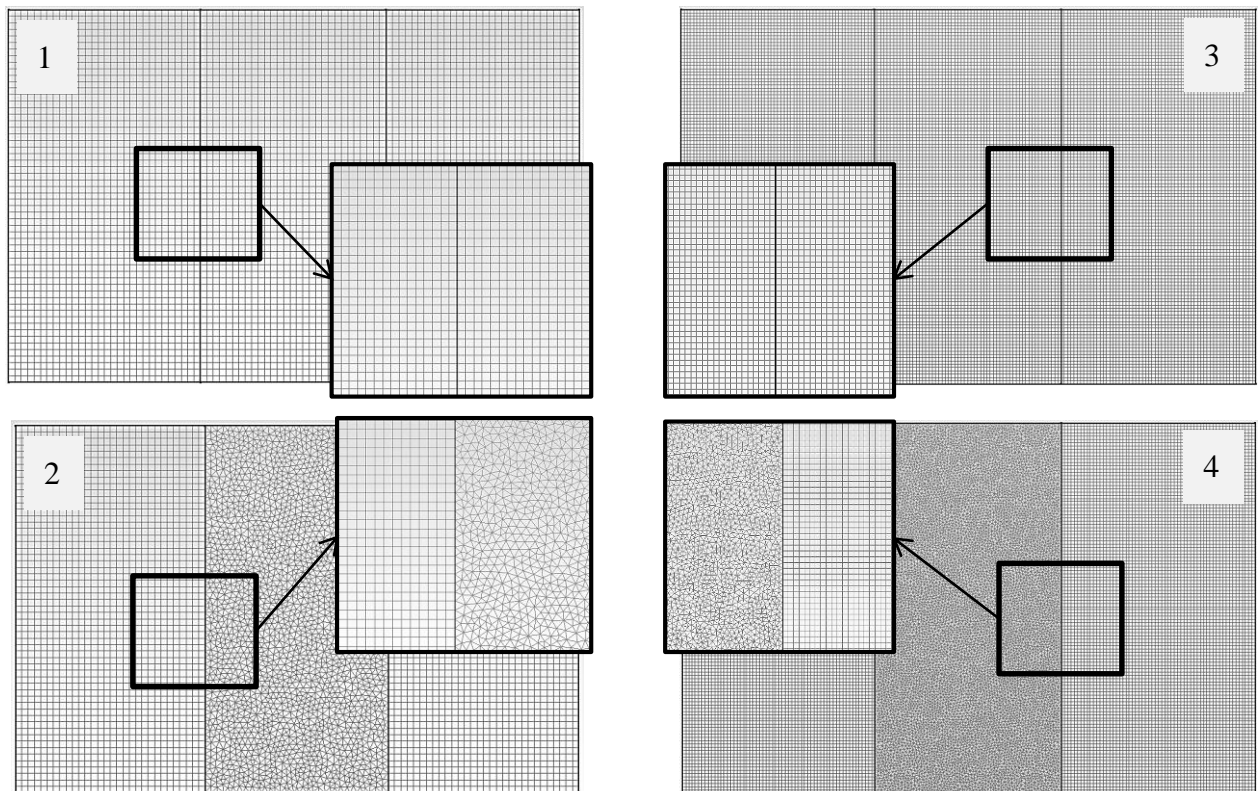


Figura 4.2. Malhas testadas com pormenor do refinamento. Malha 1 e 3 com elementos quadrados no meio poroso, Malha 2 e 4 com elementos triangulares no meio poroso.

As malhas 1 e 3 são malhas uniformes com elementos quadrados, com um tamanho de célula de 1cm/1cm e 0.5cm/0.5cm ($\Delta x/\Delta y$), respectivamente, mantendo uma relação altura-largura de 1:1. As malhas 2 e 4 têm um domínio com dois tipos de células, tendo na zona porosa uma malha com elementos triangulares e na zona não porosa uma malha com elementos quadrados. As células fora da zona porosa têm um tamanho de célula de 1cm/1cm e 0.5cm/0.5cm, respectivamente. Os triângulos da zona porosa são equiláteros e têm um comprimento médio de lado do triângulo de 1 cm e 0.5 cm, respectivamente. O número de células e as características das malhas estão representadas resumidamente na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características das malhas em estudo.

	Tipo de malha	Tamanho de lado célula	Número de Elementos
Malha 1	Elementos quadrados	1 cm	5220
Malha 2	Elementos quadrados e triangulares	1 cm	7888
Malha 3	Elementos quadrados	0.5 cm	20700
Malha 4	Elementos quadrados e triangulares	0.5 cm	32035

Para as condições de fronteira do domínio, a velocidade e a pressão nas paredes têm gradiente zero. O topo é considerado aberto e permite a entrada e saída de fluxo e a velocidade é calculada de acordo com o fluxo normal à fronteira, variando assim entre um valor fixo e gradiente nulo. É considerada a condição de não escorregamento em todas as paredes. As condições iniciais para a água são de velocidade nula e pressão hidrostática. Para a modelação da zona porosa é utilizada a equação de Darcy-Forcheimer estendida com a formulação de Engelund para os coeficientes de resistência (Tabela 2.2).

O passo de tempo escolhido é 0.001 segundos, um intervalo de escrita de 0.1 segundos, com 4 segundos de simulação. O passo de tempo e o tamanho das células foram escolhidos para garantir a condição de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), mantendo o número de Courant sempre abaixo de 1. De modo a assegurar a condição CFL em variações grandes de tamanhos de células, como acontece na passagem do *meio livre* para o meio poroso nas malhas 2 e 4, ativou-se a opção de ajuste automático do número de Courant no *OpenFOAM*. É feito um ajuste do passo de tempo durante o cálculo, garantindo um número de Courant abaixo de 1. Cada simulação teve uma duração de aproximadamente 15 minutos.

4.1.2 Comparação de resultados

Os resultados das simulações são comparados com os dados experimentais obtidos por Lin (1998) e é realizada uma análise gráfica para validar cada malha para escoamento em zonas porosas. São comparados seis instantes de tempo: 0 s, 0.35 s, 0.75 s, 1.15 s, 1.55 s e 1.95 s. Para este efeito foram colocadas 90 sondas de superfície livre igualmente espaçadas ao longo de uma linha horizontal. Deste modo é possível visualizar o comportamento da superfície livre em todo o tanque. Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, estão representados os resultados da elevação da superfície livre para as diferentes malhas nos intervalos de tempo. Os dados experimentais são fornecidos no *source-pack* do IHFOAM e usados como dados de comparação.

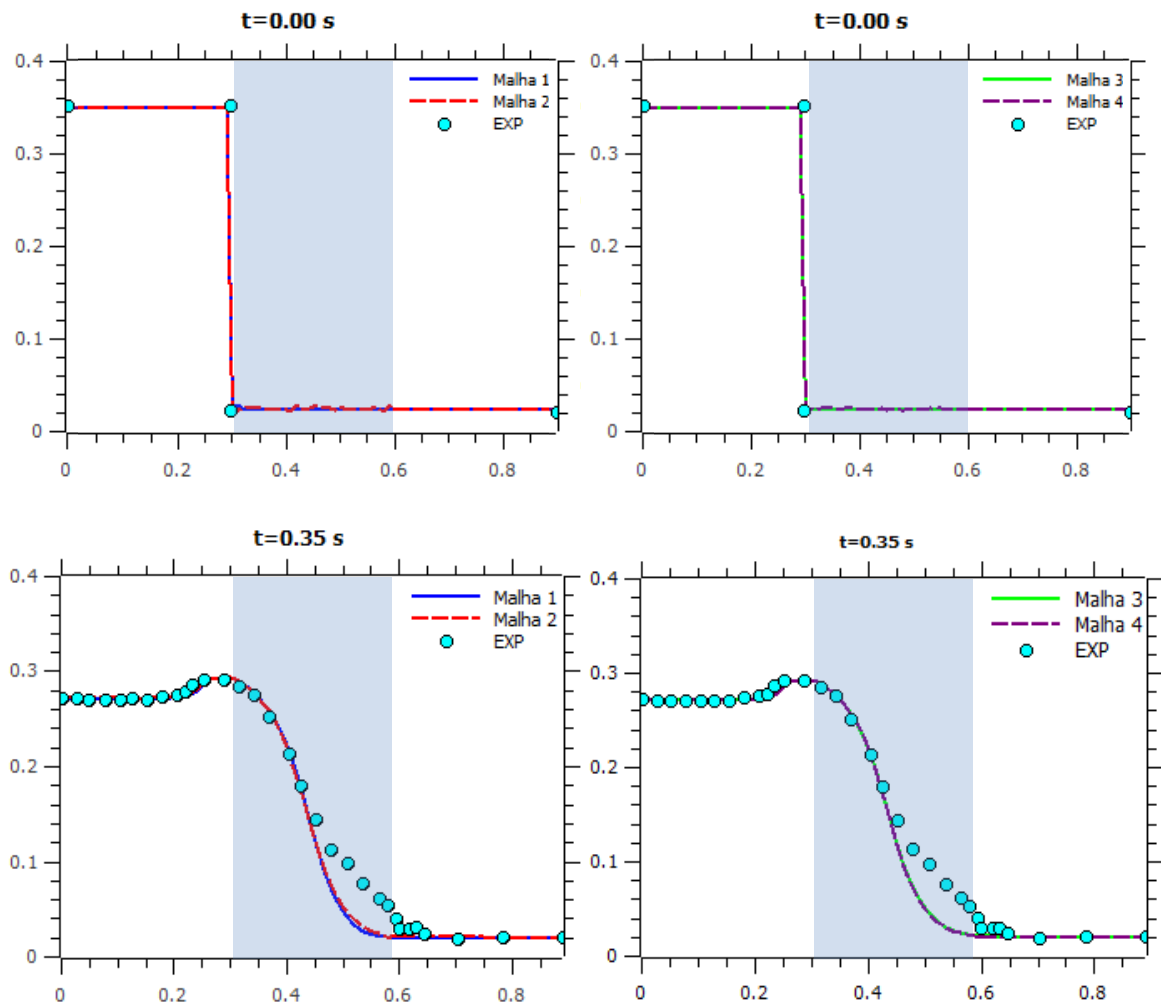


Figura 4.3. Comparação entre dados experimentais e numéricos. Nos instantes $t=0$ s e $t=0.35$ s

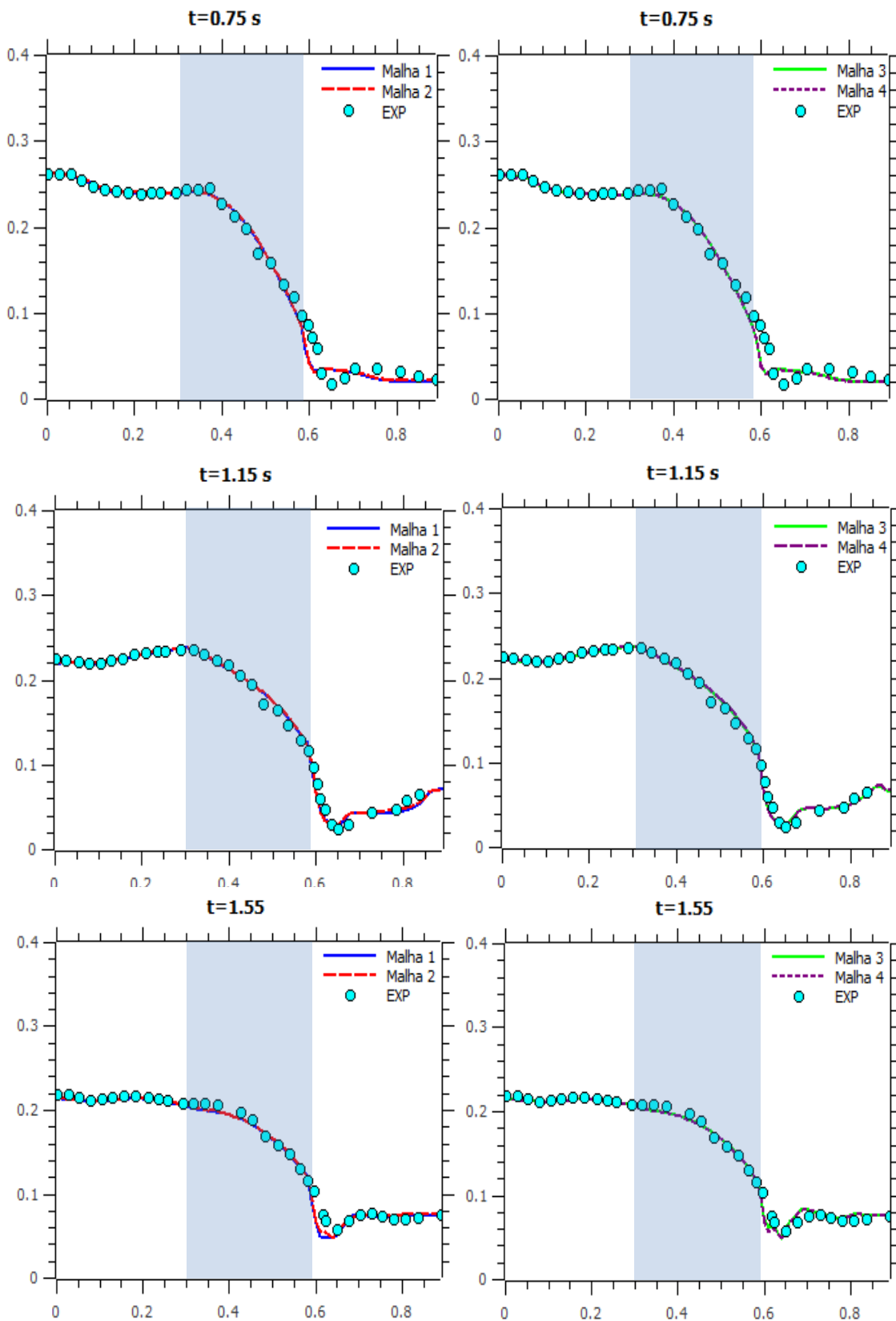


Figura 4.4. Comparação entre dados experimentais e numéricos. Nos instantes $t=0.75$ s; 1.15 s; 1.55 s

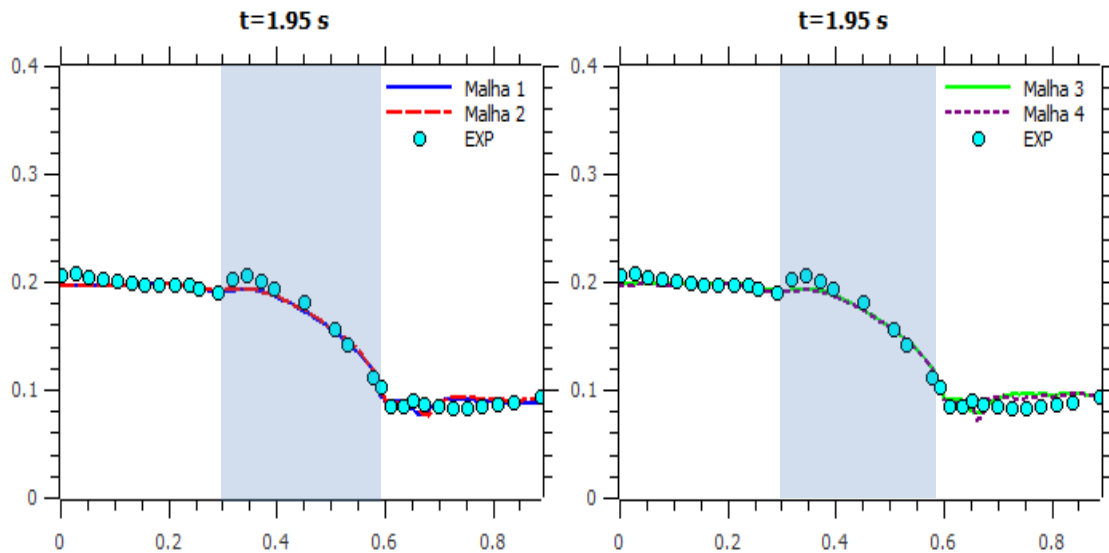


Figura 4.5. Comparação entre dados experimentais e numéricos. No instante $t=1.95$ s.

Ao comparar as simulações com os dados experimentais, observa-se um bom comportamento da superfície livre simulada fora e dentro da zona porosa. As maiores divergências entre os resultados obtidos numericamente são na interface da zona porosa e da zona não porosa, onde os gradientes de velocidade e de pressão são elevados, o escoamento é mais complexo e a variação do tamanho da célula é maior. A zona da interface da malha quadrada/triangular é uma zona crítica na simulação tendo uma grande variação de tamanho de célula, mas é demonstrado pela figuras que os valores obtidos são muito próximos dos experimentais.

No instante $t = 0.35$ s e $t = 0.75$ s observa-se uma certa discrepância entre os dados experimentais e os resultados numéricos, isto deve-se às diferenças entre as condições iniciais. No caso experimental foi utilizada uma comporta que é elevada rapidamente e que não permite que a coluna água escoe livremente. A simulação numérica não utiliza uma comporta para confinar a coluna de água. A coluna de água é definida por uma certa quantidade de células e é confinada em dois lados, do lado esquerdo e do lado inferior. Isto permite que a coluna de água escoe sem constrangimento lateral em direção à zona porosa, introduzindo uma condição inicial não correspondente à experiência. No caso experimental, a água escapa por baixo da comporta enquanto esta está a ser levantada, introduzindo uma aceleração brusca mais elevada do que no caso simulado. Isto faz com que a água inicialmente escoe mais rápido pela zona porosa, criando assim a disparidade de resultados que diminuí ao longo do tempo. Conclui-se que esta diferença não é resultado da qualidade ou do tipo de malha nem do código numérico, mas sim das condições iniciais.

Verificou-se ainda que o refinamento de malha não têm muita influência sobre o comportamento da superfície livre e que a malha mais densa não permite obter resultados significativamente mais próximos aos dados experimentais. É possível afirmar que a malha menos densa permite ter resultados satisfatórios para problemas de escoamento no meio porosa.

Da mesma forma entende-se que a malha mista permite uma boa aproximação à realidade e que os resultados das malhas mistas e das malhas com elementos rectangulares são muito próximos. Na zona porosa as diferenças de resultados entre os diferentes tipos de malha são mínimos e a influência sobre a zona não porosa também. Isto permite afirmar que os resultados obtidos, usando uma malha mista e o código numérico de *IHFOAM* para as simulações de escoamento em e sobre zonas porosas, são credíveis.

4.2 Quebra-mar poroso

Nesta segunda fase do estudo da dependência da malha pretende-se entender os efeitos do tipo de malha sobre o escoamento oscilatório dentro e fora da zona porosa de um quebra-mar poroso. Para este estudo geraram-se duas malhas: Uma malha com elementos rectangulares em todo o domínio com um tamanho de célula variável, e uma malha *mista* com células rectangulares fora e triangular dentro da zona porosa. Na zona antes e depois do quebra-mar, as duas malhas são idênticas. O domínio de estudo é o canal de ondas do LNEC, com um modelo à escala de 1:30 do quebra-mar Poente do porto de Albufeira, com geometria simplificada (Figura 4.7) a 37 m do gerador de ondas. O quebra-mar tem três mantos com tamanhos de grão e porosidades diferentes. Os resultados obtidos pelas duas malhas são comparados entre elas e são sobrepostos aos dados experimentais para que se tenha uma ideia do comportamento da superfície livre simulada e da captada experimentalmente.

4.2.1 Domínio de estudo

O canal de ondas modelado é bidimensional, tem 41 m de comprimento e 0.8 m de altura, um fundo horizontal deste o gerador de ondas até uma distância de 23.04 m e uma inclinação de 2.1% a partir de uma distância de 13.96m do pé da estrutura. A profundidade da água na zona horizontal é de 0.51m e de 0.217m no pé do quebra-mar. A Figura 4.6 representa um esquema do domínio em estudo.

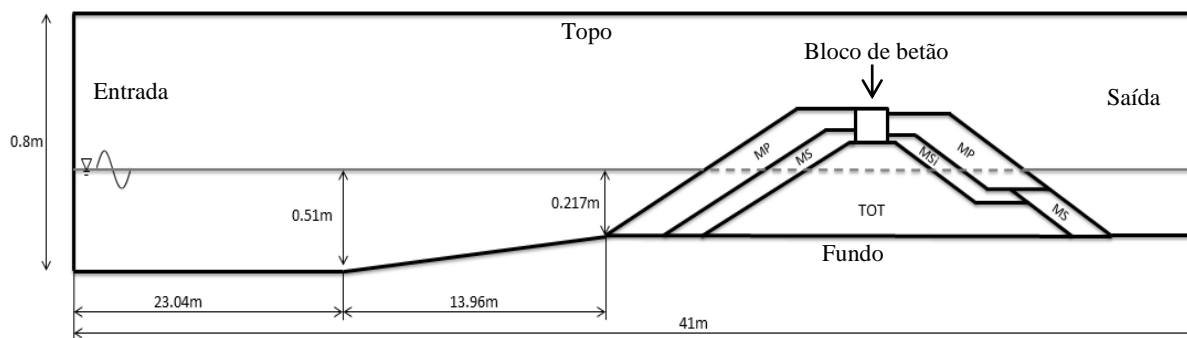


Figura 4.6. Domínio computacional do estudo da dependência da malha

A geometria do quebra-mar foi simplificada em relação ao caso experimental, mantendo todos os declives dos mantos iguais com uma relação de 1.6:3, com o objetivo de obter uma malha com elementos rectangulares mais regulares. É mantida a altura e o declive do manto principal, de forma a influenciar o menos possível a interação da onda com a estrutura e a superfície livre na interface da zona porosa e não porosa. Foi mantida a espessura do manto secundário, assim como a largura total da soma dos dois mantos. O manto principal e o manto secundário têm o mesmo declive. O comprimento do núcleo foi mantido. A altura do modelo é de 0.335 m do fundo do talude e um comprimento total de 1.596 m. A simplificação da geometria é aceitável e permite estudar o comportamento da superfície livre com os dois tipos de malha anteriormente descritos. A Figura 4.7 mostra a simplificação do manto principal (MP) e do manto secundário (MS) onde todos os declives dos mantos são paralelas (linhas tracejadas) ao manto principal simplificando a construção da malha com elementos rectangulares.

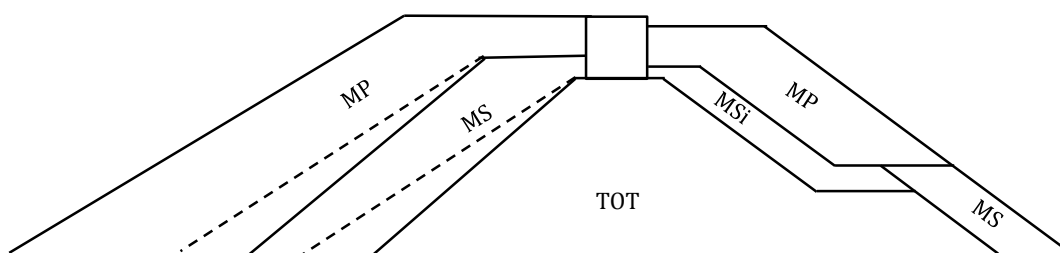


Figura 4.7. Esquematização da estrutura modelada. (simplificação a traço tracejado)

A elevação da superfície livre é medida em 5 pontos no domínio, tanto fora como dentro do quebra-mar, para entender a influência do tipo de malhas sobre a elevação da superfície livre.

A Tabela 4.2 apresenta a posição das sondas de superfície livre S6 até S10, é considerado como origem das coordenadas o pé do quebra-mar. A Figura 4.8 mostra a disposição das sondas no canal, relevantes para o estudo.

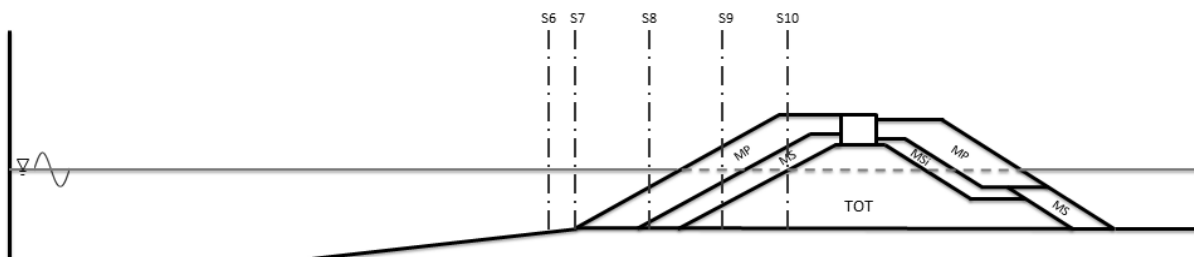


Figura 4.8. Localização das sondas no canal de ondas numérico

Tabela 4.2. Posição das sondas ao longo do canal

Sonda	S6	S7	S8	S9	S10
Posição [m]	-1.23	0.00	0.297	0.56	0.75

4.2.2 Condições de simulação

A zona porosa é constituída por três mantos com porosidades e tamanhos de grãos diferentes. No coroamento encontra-se um bloco de betão de secção rectangular e impermeável. O tamanho de grão usado na formulação de Van Gent (Tabela 2.2) é o diâmetro médio (D_{50}). Os diâmetros dos grãos foram determinados com base nos pesos dos blocos do quebra-mar, utilizando a equação 4.1 (Hydralab III, 2007) e depois escalados geometricamente, com uma relação 1:30.

$$D_{50} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [4.1]$$

Onde M_{50} é a média aritmética do peso de cada rocha e ρ_r a massa volúmica da rocha.

O manto principal (MP) tem uma porosidade de 0.35, o manto secundário (MS) tem uma porosidade de 0.35, no núcleo (TOT) a porosidade é de 0.25 e o manto secundário interior (MSi) tem uma porosidade de 0.35. Os valores escolhidos para as porosidades e para os coeficientes de resistência, seguem as considerações iniciais de Patricio (2012) e Higuera (2015) e estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros do meio poroso dos vários mantos

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
Manto Principal	0.35	100	0.7	0.34	0.053
Manto Secundário	0.35	100	1.1	0.34	0.030
Manto Secundário interior	0.35	100	1.1	0.34	0.022
Núcleo	0.25	100	1.1	0.34	0.013

Para a modelação da zona porosa é utilizada a equação de Darcy-Forcheimer estendida (eq. 2.23). Como o escoamento é oscilatório, seria necessário utilizar a formulação de Van Gent (1992) para os coeficientes de resistência. Devido à dificuldade em determinar *à priori* as velocidades dentro das diferentes camadas porosas do quebra-mar, é utilizado um KC infinito. Utilizar um KC infinitamente grande na formulação dos coeficientes de resistência de Van Gent (1992), implica que o escoamento não seja oscilatório e a formulação dos coeficientes de resistência seguem a formulação de Engelund (1953). É possível fazer uma estimativa do KC para o primeiro manto, mas para todos os outros mantos torna-se muito complicado fazer uma estimativa. Assim, decidiu-se manter a formulação de Engelund (1953), compensando o valor estático do coeficiente de resistência não linear, β . Considerou-se fiável adotar os valores para os coeficientes de resistência sugeridos por Patricio (2012), já que este estudo visa a comparação dos resultados obtidos para a superfície livre com os diferentes tipos de malha.

Na fronteira definida como entrada usou-se um batedor estático que impõe as componentes de velocidade e a altura da superfície livre. A onda gerada é uma onda regular e segue a teoria de ondas de Stokes de segunda ordem. A altura de onda é de 0.083 m e o período é de $T = 2.191$ s. No sentido de determinar o tipo de onda gerada pelo batedor, recorreu-se à Figura 2.4, utilizando a altura de onda e a profundidade perto do batedor de ondas. À saída do domínio, a fração de água pode entrar e sair consoante o fluxo. Para a velocidade à saída, a onda é absorvida, para evitar uma reflexão das ondas no limite do domínio computacional em direção ao batedor de ondas. No topo do domínio, a velocidade é determinada consoante o fluxo interno. O fundo do canal de ondas e o bloco de betão situado no coroamento do quebra-mar são definidos pelas condições de fronteira com a condição de não escorregamento. A velocidade no topo é determinada consoante o fluxo interior do domínio. A pressão é definida como hidrostática em todas as fronteiras exceto no topo do domínio, onde a condição de fronteira é a pressão atmosférica absoluta. Nas simulações recorreu-se ao modelo de turbulência $k - \epsilon$, uma análise ao efeito do modelo de turbulência será apresentada na secção 4.3

O passo de tempo escolhido é 0.001 segundos, o intervalo de escrita é de 0.04 segundos com 65 segundos de simulação, o que corresponde a 23 ondas (na sonda 6). O passo de tempo é ajustável sempre que o número de Courant seja inferior a 1. Esta opção do ajuste de passo de tempo é muito útil, devido à complexidade do escoamento perto e dentro da estrutura. Ambas as simulações foram realizadas em simultâneo pelo computador referido (secção 3.1) em 20 horas.

4.2.3 Malhas em estudo

Conhecendo o domínio de estudo, foram modeladas duas malhas com a geometria e as dimensões anteriormente referidas. As malhas foram geradas com o programa de geração de malha GMSH (Geuzaine & Remacle, 2009), usando a programação GMSH para a geração de malha e o interface gráfico para a sua visualização. Como a geometria do quebra-mar é relativamente complexa, torna-se difícil obter uma malha de elementos rectangulares de boa qualidade. Para este fim são necessários vários pontos de referência no domínio, para obter uma malha com elementos rectangulares e estruturada de boa qualidade com boa ortogonalidade. A ortogonalidade da malha é muito importante e é necessário garantir uma boa ortogonalidade dos elementos, de forma a melhorar resultados da simulação. Os *solvers* de multi-fase que usam o método VOF são muito sensíveis à falta de ortogonalidade de malha. Realizaram-se vários testes não contemplados nesta dissertação que mostraram, que com uma malha pouco ortogonal existem deslocamentos de massa de água nos primeiros instantes nas zonas com pouca ortogonalidade. Isto pode ser consequência do uso do método VOF e do método de reconstrução da superfície livre (Morgen, 2013). A programação de uma malha com elementos rectangulares e estruturada em geometrias complexas torna o código muito extenso e moroso na sua programação e o objetivo deste estudo é diminuir o tempo dispensado na criação da malha (Geuzaine & Remacle, 2009). No caso da malha mista a geração de malha é menos morosa e o código é menos complexo.

Em ambas as malhas são usadas células de diferentes tamanhos, garantindo uma variação do tamanho dos elementos não superior a 10%. A malha é mais refinada na zona de maiores gradientes (perto e dentro do quebra-mar) e menos densa na zona onde o escoamento é menos complexo (a jusante do quebra-mar). Isto reduz o tempo de cálculo, diminui os recursos computacionais e mesmo assim garante a qualidade dos resultados obtidos. É garantida uma relação entre a altura e a largura do elemento de 6:1 na zona a jusante da estrutura, 3:1 na zona de geração de ondas e de aproximadamente 1:1 perto e dentro da zona porosa. O tamanho dos

lados da célula perto e dentro do modelo é de 0.984 cm. No estudo anterior (secção 4.1) mostrou-se uma boa aproximação com uma malha com elementos de 1cm de lado.

As malhas têm 8 elementos para uma altura de onda e 152 elementos por comprimento de onda. É importante garantir no mínimo 5 elementos por altura de onda e 75 elementos por comprimentos de onda, seguindo as recomendações de Higuera (Higuera, 2015a) para obter perfil de onda próximo da realidade, para a situação da propagação da onda. Na Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam-se as malhas utilizadas e na Tabela 4.4 as características.

Tabela 4.4. Características das malhas em estudo

	Tipo de malha	Nº de elementos	Relação largura-altura
Malha 1	Elementos rectangulares	129085	1:1 a 6:1
Malha 2	Elementos rectangulares e triangulares	125683	1:1 a 6:1

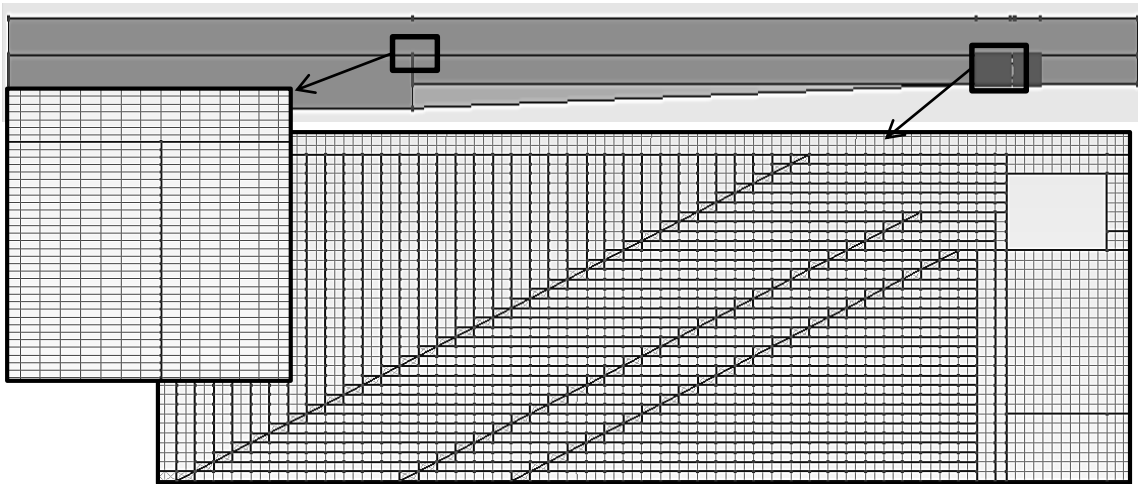


Figura 4.9. Malha com elementos rectangulares em todo o domínio fora e dentro do quebra-mar (traço grosso são linha construídas; traço fino são geradas pelo gerador de malha)

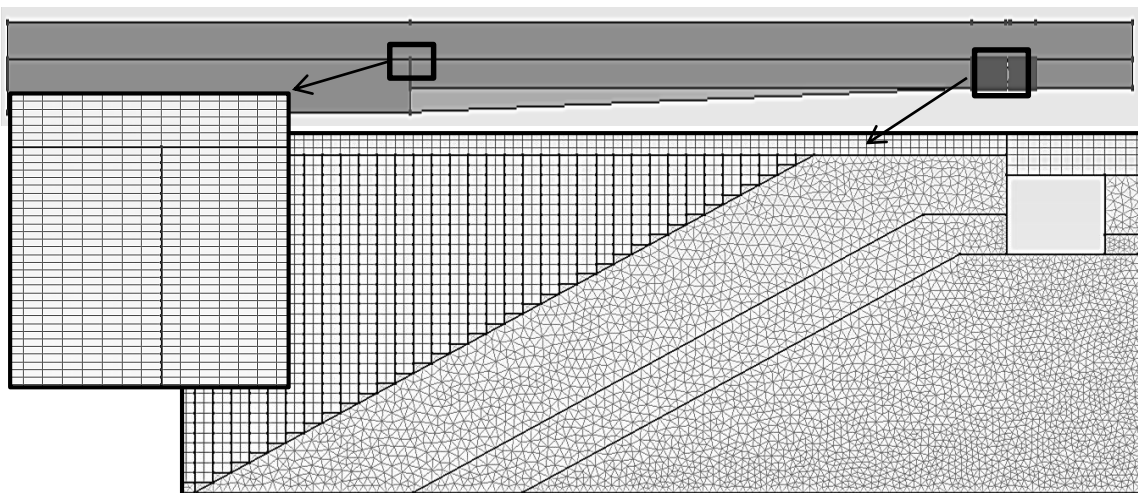


Figura 4.10. Malha mista, com elementos rectangulares fora e triangulares dentro do quebra-mar (traço grosso são linha construídas; traço fino são geradas pelo gerador de malha)

4.2.4 Comparação de resultados

Os resultados apresentados foram captados nas posições referidas (Tabela 4.2) com auxílio de sondas de superfície livre numéricas nas duas malhas. Serão apresentados os resultados para a sonda 6 e sonda 7, que estão localizadas antes do quebra-mar, e para as sondas 8, 9 e 10, que estão dentro quebra-mar. Pretende-se entender a influência do tipo de malha na zona porosa sobre a reflexão e dissipação da onda, tal como sobre a elevação da superfície livre dentro do quebra-mar. Nas Figura 4.11 e Figura 4.12 são representadas as elevações da superfície livre, em metros, em função do tempo, em segundos, nas diversas sondas numéricas.

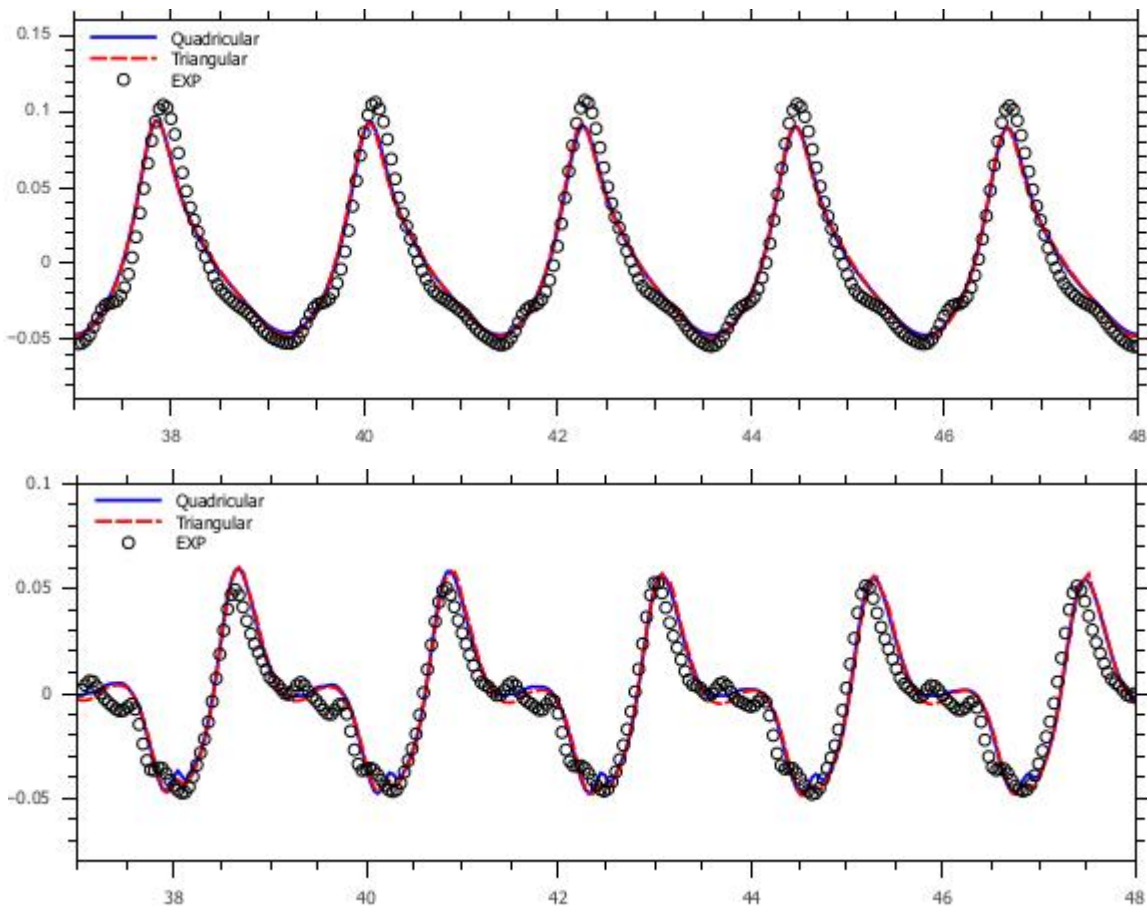


Figura 4.11. Comparação entre resultados obtidos entre as duas malhas, Sonda 6 e 7 (cima e baixo respetivamente)

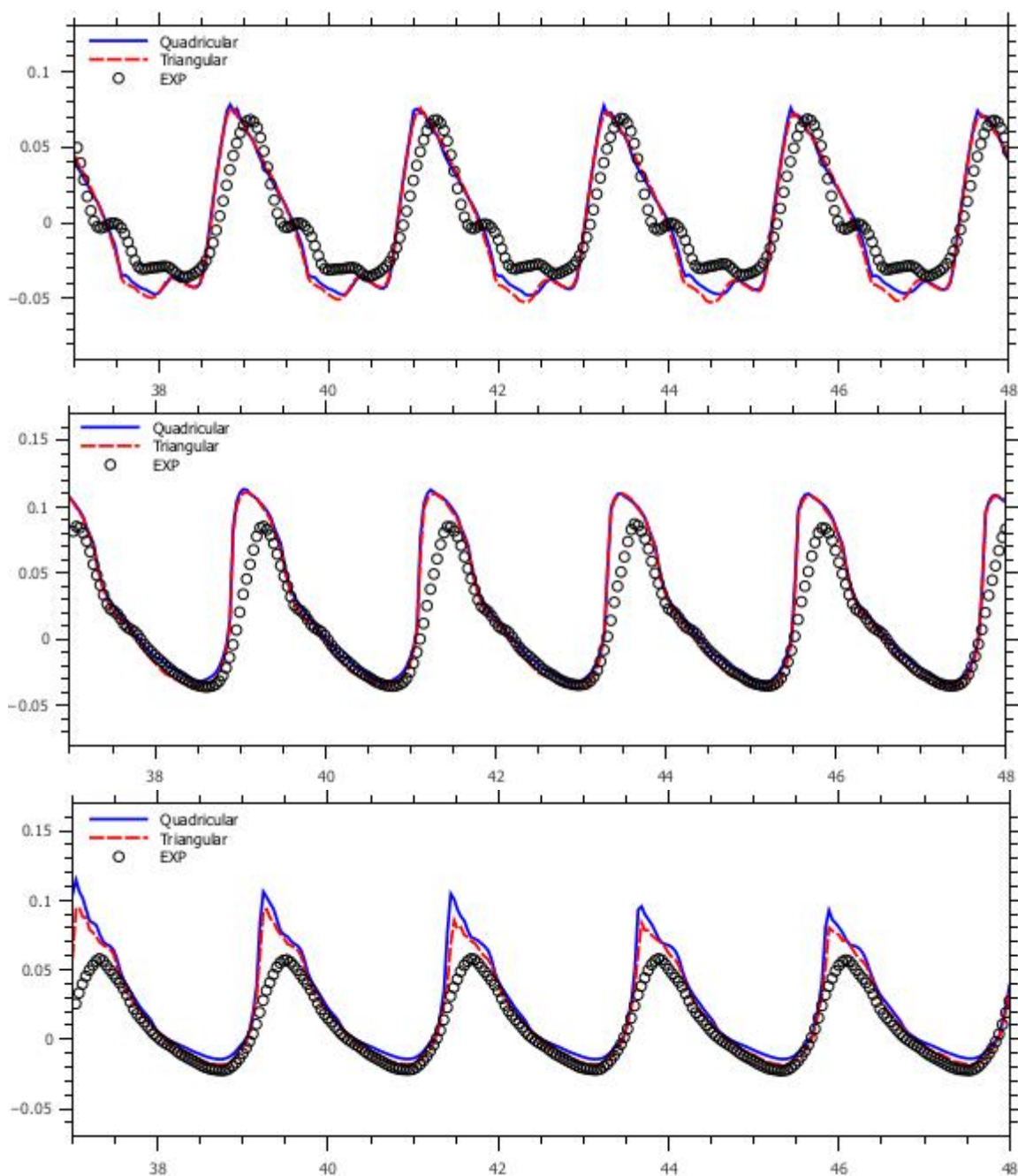


Figura 4.12. Comparação entre resultados obtidos entre as duas malhas, Sonda 8 a 10 (de cima a baixo respetivamente).

Os resultados mostram que, na globalidade, os dois tipos de malha são adequados para a realização de simulações de interação de ondas com quebra-mares porosos com o *IHFOAM*. Sem que tenha sido um objetivo deste estudo, observa-se uma boa semelhança de resultados entre os dados experimentais e simulados, fora e dentro do quebra-mar. As diferenças entre os resultados numéricos e experimentais devem-se, em primeiro lugar, às diferenças geométricas que foram

mantidas mínimas, mas ainda assim têm uma influência considerável sobre a reflexão, a transmissão, dissipação e elevação da onda (secção 2.4). Em segundo lugar, é necessário calibrar os coeficientes de resistência e a porosidade para cada manto do quebra-mar e talvez seja este último que tem mais importância.

Analisando as figuras, é possível afirmar que o andamento da onda varia pouco com o tipo de malha. Nas Sondas 6 e 7, as sondas localizadas fora do quebra-mar, não se verificam diferenças notáveis entre as duas malhas. Em ambas as malhas a onda é subestimada na sonda 6. Na sonda 7 observa-se uma diferença na cava da onda entre as simulações das duas malhas, o que pode ser causado pela onda refletida da zona porosa da estrutura. Esta diferença é mínima e é considerada aceitável. Pode-se observar na sonda 8 que as duas malhas diferem levemente no registo da cava da onda. Tendo a malha triangular uma altura de refluxo maior. Os dados obtidos pela onda 9 mostram coincidência entre os resultados. A sonda 10, a mais coberta pela zona porosa, regista que a malha triangular oferece menos resistência à ondulação. Com a malha com elementos rectangulares a água tem mais dificuldade em descer pelo meio poroso.

No geral, podemos observar que a malha com elementos triangulares torna a zona porosa um pouco mais permeável que a malha com elementos rectangulares. Este fato pode ser resultado do método VOF e da forma como o *OpenFOAM* capta a superfície livre, já que ambos dependem da geometria da célula. Mesmo assim as diferenças são mínimas e plenamente aceitáveis. Os dados para a elevação da superfície livre mostram que as duas malhas estudadas podem ser utilizadas para este tipo de estudo. Esta conclusão é muito importante quando se refere ao tempo economizado pela construção de uma malha com elementos triangular em relação a uma malha com elementos rectangulares. Com este estudo foi demonstrado que não se justifica uma criação de uma malha com elementos rectangulares na zona porosa em estudos com quebra-mares porosos.

4.3 Modelo de turbulência $k - \epsilon$

Nesta parte do trabalho são feitas duas simulações com a malha mista da secção 4.2: uma simulação com modelo de turbulência $k - \epsilon$ e uma sem modelo de turbulência e compara-se os resultados entre eles. Aplicaram-se as mesmas condições de fronteira e gerou-se a mesma onda que na secção 4.2, para garantir uma comparação rigorosa. É necessário entender os efeitos sobre a elevação da onda dentro e fora do quebra-mar. Este estudo visa perceber se é vantajoso usar o modelo de turbulência $k - \epsilon$ em problemas de engenharia costeira desta natureza e entender a

dependência dos resultados do modelo de turbulência. O uso do modelo de turbulência aumenta o tempo de cálculo e é computacionalmente mais dispendioso. Isto implica que esta análise seja importante do ponto de vista a economizar estes parâmetros sem perder qualidade de resultados.

4.3.1 Comparação de resultados

Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados os resultados pela simulação sem modelo de turbulência nas sondas 6 a 10 e comparados com os resultados na secção 4.2.

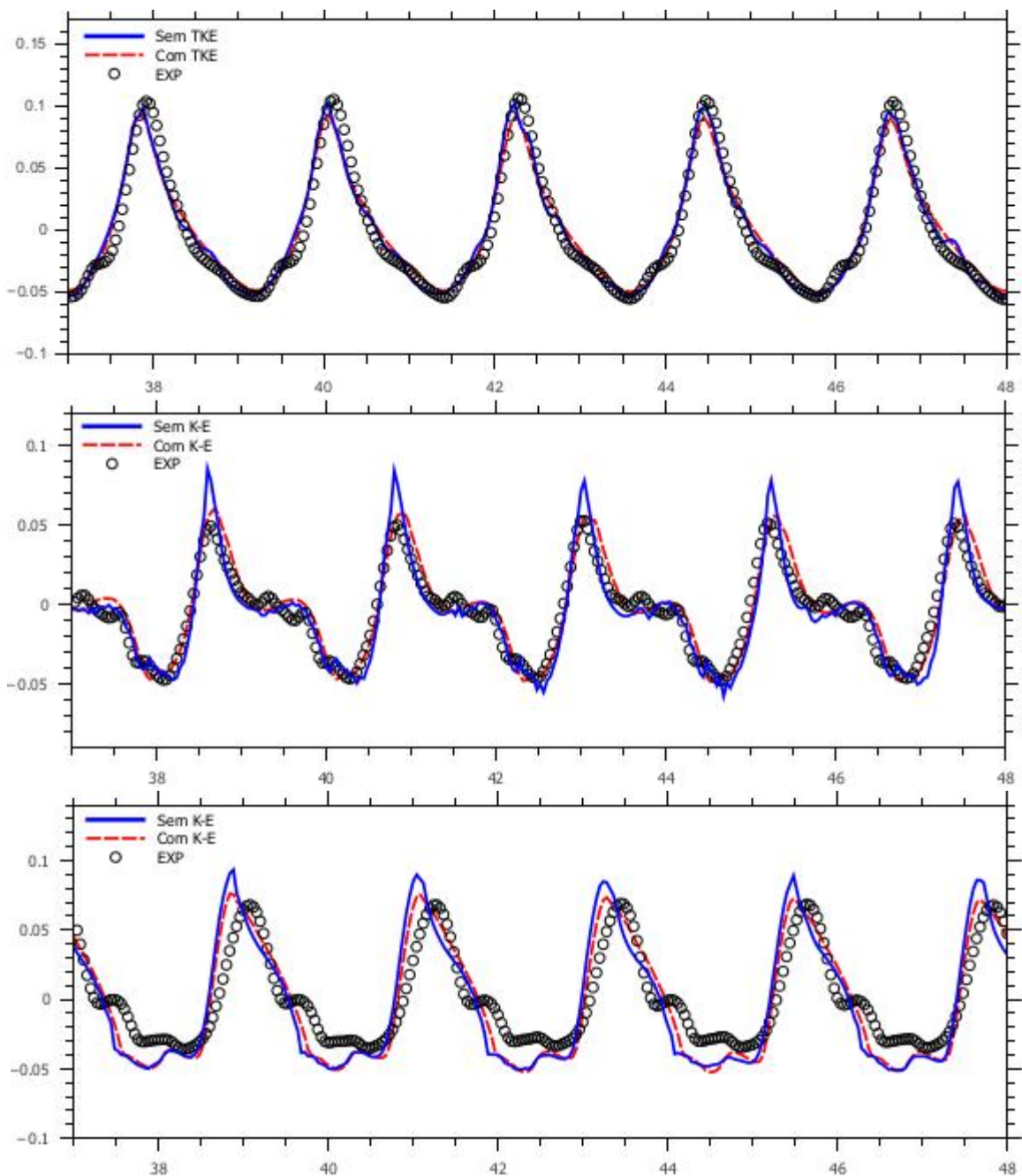


Figura 4.13. Comparação entre resultados obtidos com e sem modelo de turbulência $k - \epsilon$, Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente)

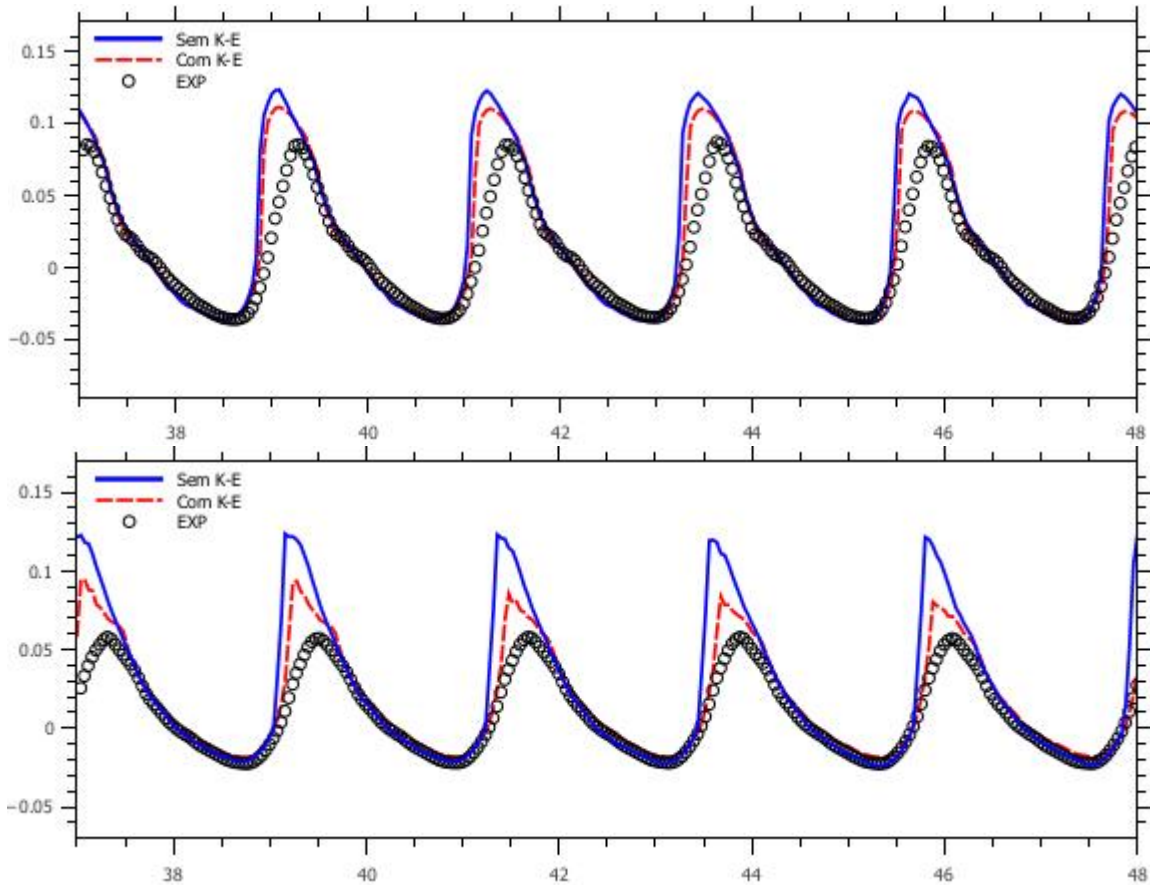


Figura 4.14. Comparação entre resultados obtidos com e sem modelo de turbulência $k - \epsilon$, Sonda 9 e 10 (em cima e em baixo, respetivamente)

Na sonda 6 a elevação da onda sem modelo de turbulência $k - \epsilon$, é mais elevada. São ainda notáveis pequenas oscilações de maior frequência da superfície livre, as quais são causadas por ondas refletidas pela estrutura que se deslocam em sentido do batedor. Estas oscilações de superfície não se verificam com o modelo de turbulência $k - \epsilon$ devido ao seu efeito dissipativo. No caso experimental também se observa este fenómeno, mas com menos intensidade.

A sonda 7 está localizada no pé do quebra-mar, onde as acelerações são elevadas devido às ondas refletidas. Como a modelação da turbulência nas equações RANS é entendida como uma adição ao termo viscoso, acontece que a simulação com modelo de turbulência $k - \epsilon$ oferece maior resistência à elevação da superfície livre, quando esta é acelerada. Observa-se uma elevação excessiva sem modelo de turbulência $k - \epsilon$ e com muitas flutuações na superfície livre. É preciso ter em conta os efeitos turbulentos para obter resultados perto dos experimentais.

As sondas 8 e 9 vêm confirmar que, sem modelo de turbulência a onda eleva-se com maior facilidade, tendo um crescimento mais rápido e uma amplitude mais elevada. Sem modelo de

turbulência são respeitadas a forças inerciais e viscosas, mas neste ponto do domínio, a energia perdida pelas turbulências é considerável e influencia o comportamento da onda. Dentro do quebra-mar, na Sonda 10, as diferenças são mais acentuadas e devem-se à turbulência existente dentro dos mantos. O modelo de turbulência introduz uma resistência adicional ao escoamento atenuando mais a elevação de onda dentro do quebra-mar.

Para a simulação sem modelo de turbulências seria necessário alterar os coeficientes de resistência do meio poroso. Os coeficientes de resistência usados neste estudo seguem os valores de Patrcio (2012) que utilizou o modelo numérico IH2VOF que também têm o modelo de turbulência $k - \epsilon$ implementado na zona porosa. É possível calibrar os coeficientes de resistência sem modelo de turbulência $k - \epsilon$ e obter valores próximos das simulações com modelo de turbulência $k - \epsilon$, já que o gradiente hidráulico cresce com a velocidade e têm um efeito dissipador consoante a velocidade. Mesmo assim, fora de zona porosa, é necessário o modelo de turbulência para obter valores mais próximos aos dos dados experimentais. Nas simulações que seguem neste trabalho, será usado o modelo de turbulência $k - \epsilon$.

5 Caso de Estudo: Interação de ondas com um quebra-mar poroso

O caso de estudo na presente dissertação é a simulação numérica da interação de ondas com o quebra-mar poente do porto de pesca de Albufeira, com o programa *OpenFOAM*, usando o solver *IHFOAM*. São realizados dois estudos: Numa primeira fase, é feita uma calibração dos parâmetros do meio poroso e uma análise sobre os efeitos da variação dos parâmetros sobre a superfície livre. Numa segunda fase, é feito um estudo sobre os efeitos dos coeficientes de resistência do meio poroso sobre o volume galgado no coroamento do quebra-mar.

O porto de pesca é protegido por duas construções marítimas em talude, o quebra-mar poente e o quebra-mar nascente. A Figura 5.1 mostra as duas construções.

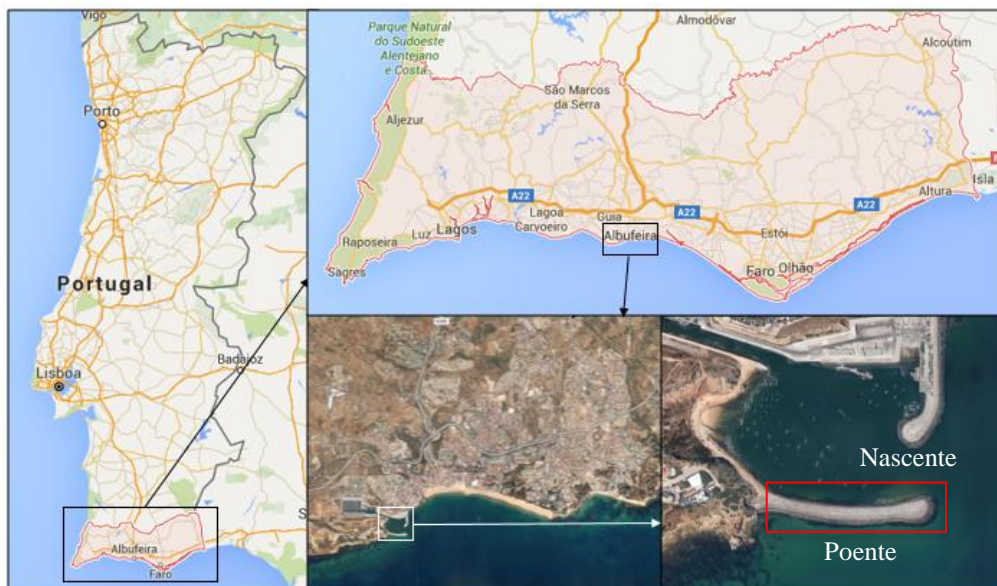


Figura 5.1. Imagem da zona do Algarve e da área do porto de pesca de Albufeira (googleMaps, 2015)

A construção do porto de pesca foi finalizada em 2002 e serviu como caso de estudo experimental realizado no LNEC no âmbito do projeto “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) para aplicações a estruturas costeiras” (Didier et al., 2013).

O estudo experimental foi realizado no canal de ondas do LNEC com um modelo à escala de 1:30 e os dados obtidos são usados neste trabalho para efeitos de comparação. Foi estudada uma secção transversal do quebra-mar poente do porto de pesca, assinalada na Figura 5.2.



Figura 5.2. Localização da secção transversal do quebra-mar em estudo (googleMaps, 2015)

5.1 Descrição do protótipo

O quebra-mar poente do porto de pesca tem 275 m de comprimento e foi construído como proteção do porto contra a agitação marítima. A secção transversal em estudo é constituída por dois mantos de enrocamento do lado exterior, dois do lado interior do porto de pesca, um núcleo poroso com todo o tipo (TOT) de pedra e um passadiço de betão impermeável na zona central do coroamento do quebra-mar. O nível de maré considerado é de +3.5 m relativo ao zero hidráulico (ZH), com duas agitações marítimas distintas com uma altura de onda de 2.5 m e 3.3 m, mantendo o período de 12 s.

O manto exterior é constituído por um manto resistente e um filtro com enrocamentos diferentes. O manto resistente é composto por duas camadas de enrocamento de blocos de 90 a 120 kN com um elevado grau de arrumação. Este manto tem um declive 1.6:3, uma altura de coroamento de 7 m (ZH) e é fundeada a -3 m (ZH). A berma exterior do coroamento tem um comprimento de aproximadamente 5.9m. O filtro (manto secundário) tem um enrocamento de 10 a 30 kN, tendo o mesmo declive na interface do manto resistente/filtro e na interface filtro/núcleo de 2:3.

Do lado interior o manto principal tem uma inclinação de 2:3, uma altura de 6,5m (ZH) e é fundeado a -3 m (ZH). A berma interior do coroamento tem perto de 5.7 m de largura. O enrocamento do manto principal é dividido em duas partes – uma parte superior com blocos de 90 a 120 kN do coroamento a ZH e uma parte inferior com 10 a 30 kN do ZH até ao fundo. O filtro do manto tem um enrocamento de blocos de menor dimensão de 5 a 10 kN.

O passadiço de betão impermeável localizado no centro do coroamento tem uma secção quadrática de 3m × 3m e tem uma cota de 6.5 m (ZH). A Figura 5.3 mostra detalhadamente a secção transversal do quebra-mar.

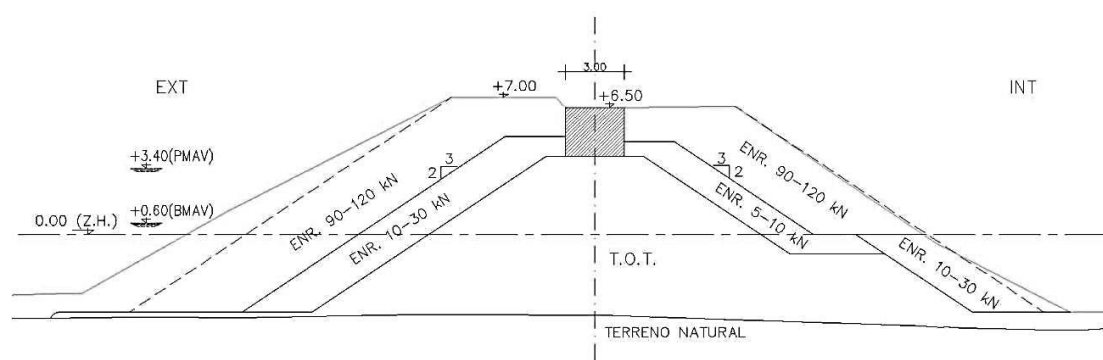


Figura 5.3. Secção do quebra-mar, à escala de protótipo (Didier et al., 2013)

5.2 Descrição experimental

Os ensaios experimentais foram realizados num canal de ondas do LNEC com um modelo à escala de 1:30, da secção transversal referida. Os blocos dos mantos foram escalados, utilizando a equação 4.1 e a agitação marítima, consoante a lei de Froud (Hydralab, 2007). As dimensões do canal de ondas são 44.9 m × 1.6 m × 1.2 m, estando o gerador de ondas a 23.04 m da rampa, esta com inclinação de 2.1%, prolongando-se por 13.96 m até ao pé do quebra-mar, Figura 5.4.

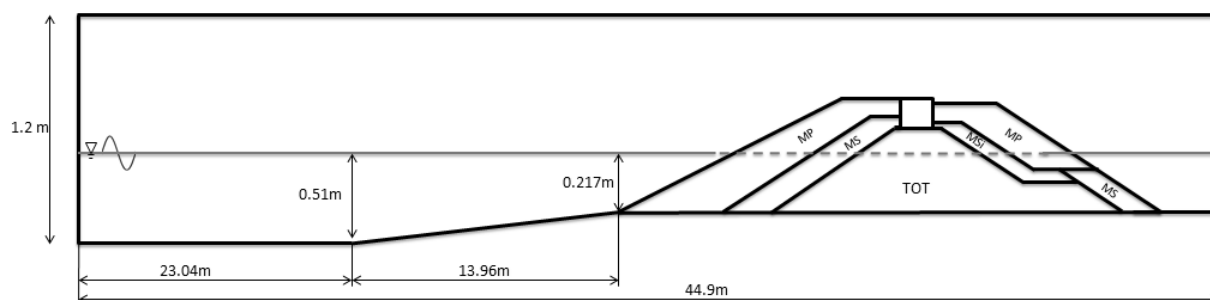


Figura 5.4. Domínio da experiência física

O nível de água e as alturas de onda foram escalados geometricamente e os períodos foram escalados de acordo com a semelhança de Froud (Hydralab, 2007). As características da agitação dos casos simulados e o nível de água estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Agitação marítima à escala de modelo e protótipo

	Protótipo		Modelo	
Nível de água	6.5 m (do fundo no pé do talude)		0.217 m	
Altura de onda	2.5m	3.3m	0.083m	0.11m
Período	12 s		2.191 s	

O modelo da secção transversal do quebra-mar foi escalado geometricamente, mantendo-se os efeitos de escala com as instalações disponíveis no LNEC reduzidos. Na Figura 5.5 está representada a secção transversal da estrutura estudada e nota-se o elevado grau de arrumação dos blocos, que implica uma baixa da porosidade (Viegas, 2014).



Figura 5.5. Secção do modelo no canal de ondas do LNEC (Viegas, 2014)

O estudo experimental permitiu obter a elevação de superfície em dez pontos do canal recorrendo a dez sondas resistivas. As sondas foram colocadas a montante, dentro do quebra-mar e uma sonda no centro do coroamento. A Figura 5.6 mostra a posição das sondas e a Tabela 5.2 indica as posições exatas. Como referencial para as cotas foi tomado o pé do quebra-mar.

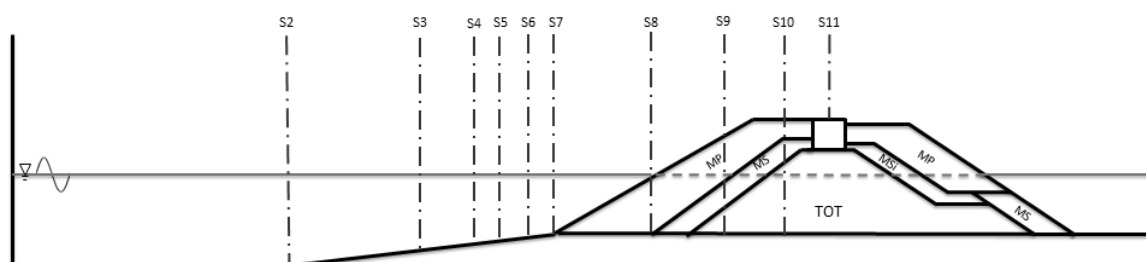


Figura 5.6. Representação da posição das sondas no canal de ondas no LNEC

Tabela 5.2. Localização das Sondas no canal de ondas do LNEC

Sonda	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Posição [m]	-13.96	-3.79	-2.53	-2.04	-1.23	0.00	0.297	0.56	0.75	0.875

A sonda mais a montante S2 permite controlar a onda gerada pelo batedor. As restantes sondas S3 a S7, colocadas a montante da estrutura, captam a elevação da onda. As sondas S8 a S10 medem a elevação da água dentro da zona porosa e a elevação acima da estrutura, como o espraiamento e o refluxo. A sonda 11 permite obter a altura da lamina de água galgada. A água galgada é coletada numa bacia em qual a altura de água é medida com uma sonda, de forma a determinar o volume galgado por metro (Viegas, 2014). Cada ensaio teve uma duração de 60 s.

5.3 Descrição das Simulações numéricas

5.3.1 Domínio em estudo

O domínio computacional representa o domínio do estudo experimental do LNEC. O canal de ondas é estudado em duas dimensões e foi encurtado na zona a jusante do quebra-mar e diminui-se a altura do canal, de forma a diminuir tempo de cálculo. O canal de ondas fica assim com dimensões de 41 m × 0.8 m (Figura 5.7). São incluídas 5 zonas porosas com 3 porosidades e tamanho de grão diferentes. As sondas numéricas que captam elevação da superfície livre estão nas mesmas posições que o caso experimental.

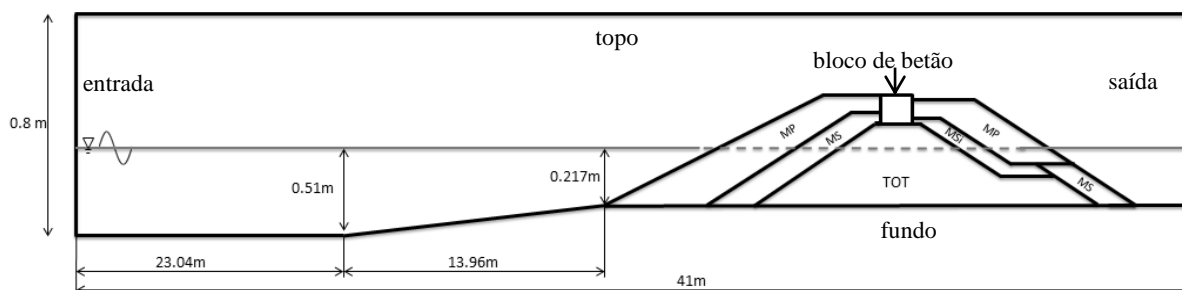


Figura 5.7. Domínio computacional do caso de estudo

5.3.2 Geração de malha

Gerou-se uma malha *mista* com elementos rectangulares na zona fora do quebra-mar e triangular na zona porosa. A malha tem um refinamento adaptado tendo no total 300274 elementos, sendo 263498 rectangulares e 36776 triangulares. Garantiu-se assim 17 elementos por altura de onda em todo o domínio e 217 por comprimento na zona de geração da onda, zona de menor refinamento (exceto a sotamar do quebra-mar) e um rácio de largura-altura de aproximadamente 1:1 perto e dentro do quebra-mar até 6:1 longe do quebramar. A variação dos elementos é progressiva, não excedendo os 10%. Foi escolhida um refinamento mais densa que o mínimo sugerido por Higuera (Higuera, 2015a), para garantir que todos os fenómenos do escoamento são captados. O maior refinamento foi feito perto e dentro do quebra-mar para captar os fenómenos hidrodinâmicos que ocorrem nesta zona.

Como esta malha é utilizada também nos ensaios com galgamento, foi importante refinar a zona superior ao quebra-mar, já que o galgamento ocorre rapidamente, criando fortes gradientes. Logo, é importante ter um bom refinamento acima do bloco de betão. As características da malha seguem as justificações detalhadas na secção 4.2, respeitando o compromisso entre os resultados obtidos e o tempo de cálculo e recursos computacionais utilizados. A malha foi programada e gerada com o código GMSH e está representada na Figura 5.8.

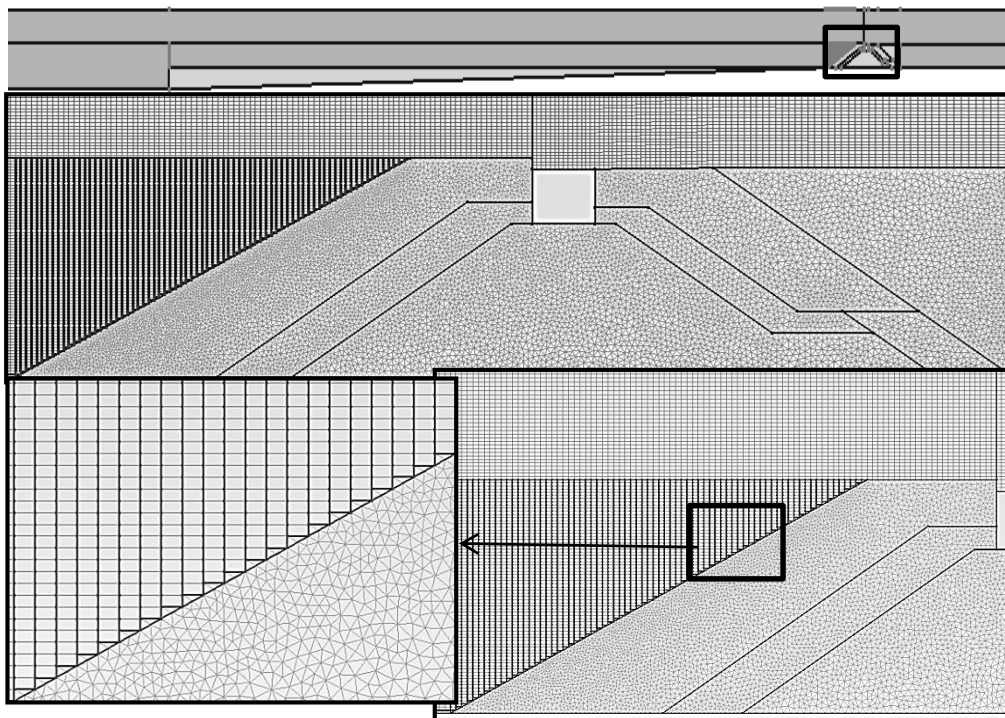


Figura 5.8. Malha modelada para o caso de estudo

5.3.3 Condições de simulação

Para a condição de fronteira de entrada do domínio (Figura 5.4) definiu-se um batedor estático que gera uma onda regular de Stokes de segunda ordem. O batedor funciona com absorção ativa de ondas refletidas (secção 3.2). O topo do domínio permite a entrada e saída de ar e água, a velocidade é calculada nesta fronteira consoante o fluxo interno e a pressão definida como pressão absoluta. O fundo e o bloco de betão são definidos da mesma forma com a condição de não escorregamento sendo a pressão definida como hidrostática e velocidade nula. A saída do domínio funciona como absorvedor de onda, evitando reflexões da onda do limite do domínio em direção ao batedor e a pressão é definida como hidrostática. O nível de água considerado é de 0.217 m no pé do quebra-mar. O tempo de simulação é 65 s com um passo de tempo de 0.001s (mas com o passo de tempo variável ativado) e a frequência de mediação da superfície livre de 25Hz, ou seja, um intervalo de escrita de 0.04s. Foram simulados 29 períodos e as simulações demoram aproximadamente 25 horas em média.

5.4 Interação de ondas com um quebra-mar poroso sem galgamento

Neste subcapítulo são estudados os efeitos da variação dos coeficientes de resistência e da porosidade sobre a elevação da superfície livre, dentro e fora do quebra-mar. É feita uma calibração dos parâmetros do meio poroso e apresentado o método utilizado para obter uma solução próxima dos dados experimentais. Os resultados obtidos numericamente são comparados com os resultados da superfície livre em função do tempo obtidos experimentalmente.

A onda gerada é uma onda regular de Stokes segunda ordem. A altura de onda é 0.083 m com um período de 2,191 s, com um nível de água de 0.51 m perto do batedor e 0.217 m no pé da estrutura (Tabela 5.1). Esta altura de onda corresponde a 2.5 m à escala de protótipo e não origina galgamento sobre o quebra-mar.

5.4.1 Calibração dos parâmetros do meio poroso

Como referido na secção 2.6 é necessário calibrar os parâmetros do meio poroso consoante o caso em estudo. A variação da geometria da estrutura e as características da zona porosa influenciam o escoamento interno e externo do meio poroso, tal como o regime e o tipo de escoamento. Para atingir uma coincidência da superfície livre simulada com os dados experimentais, é feita uma calibração sequencial da porosidade e dos coeficientes de resistência. Em seguida são discutidos os resultados, fazendo uma análise gráfica e uma análise estatística.

Para a análise estatística foram utilizados o enviesamento (bias), desvio padrão (RMS) e o índice de concordância (IC) (Willmot, 1981).

$$bias = \frac{1}{n_{dados}} \sum_{n=1}^{n_{dados}} (y_n - x_n) \quad [5.1]$$

$$rms = \left(\frac{1}{n_{dados}} \sum_{n=1}^{n_{dados}} (y_n - x_n)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad [5.2]$$

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{dados}} (y_n - x_n)^2}{\sum_{n=1}^{n_{dados}} (|y_n - \bar{x}| + |x_n - \bar{x}|)^2} \quad [5.3]$$

Onde x_n são os dados experimentais, y_n os dados numéricos, n_{dados} a quantidade de dados e \bar{x} é a média dos valores experimentais.

Para o início da calibração dos parâmetros do meio poroso das diferentes camadas porosas do quebra-mar, recorreu-se aos valores da Tabela 4.3. Estes valores são usados como ponto de partida e seguidamente modificados, até garantir uma boa coincidência com os dados experimentais. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros utilizados para calibração, do Manto Principal (MP), Manto Secundário (MS), Manto Secundário interior (MSi) e Núcleo,

Tabela 5.3. Valores utilizados na calibração dos parâmetros do meio poroso

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.3, 0.35, 0.4, 0.45	100	0.7, 0.9, 1.1	0.34	0.053
MS	0.25, 0.3, 0.35, 0.4	100	1.1, 1.5, 2	0.34	0.030
MSi	0.25, 0.3, 0.35, 0.4	100	1.1, 1.5, 2	0.34	0.022
Núcleo	0.2, 0.25, 0.3, 0.35	100	0.9, 1.1, 1.3	0.34	0.013

Ao longo da calibração manteve-se o coeficiente linear α constante, variando a porosidade n e o coeficiente não linear β . Não se deu atenção à calibração do α sabendo que as influências do α em escoamento não laminares é reduzido. Patricio (2012) demonstrou por intermédio do volume galgado que o α tem pouco influência em problemas desta natureza e Higuera (2015) mostra que os resultados são pouco influenciados numa larga gama de valores de α . Os parâmetros para o manto secundário e o manto secundário interior foram variados em simultâneo.

Foram realizados 17 ensaios, variando cada parâmetro independentemente. Como a porosidade é um parâmetro muito influente para o comportamento do meio poroso, iniciou-se o estudo com a calibração da porosidade. Variou-se a porosidade para um manto e mantiveram-se os restantes parâmetros constantes. Os outros mantos mantêm os valores que caracterizam o seu meio poroso. Em seguida é feita uma análise gráfica e estatística da elevação da onda e é determinado o valor que mais se aproxima aos dados experimentais. Segue-se depois a variação da porosidade do próximo manto, mantendo o valor do manto anteriormente determinado. Esse método também é aplicado ao coeficiente de resistência não linear β e no estudo com galgamento.

5.4.2 Calibração da porosidade

5.4.2.1 Manto principal

O manto principal é o mais influente sobre o escoamento externo e interno, o espriamento e o refluxo, e é também o manto que mais energia absorve durante a interação das ondas, tendo assim uma forte ação sobre a sua reflexão e o galgamento. Iniciou-se a calibração da porosidade com o manto principal, mantendo a porosidade constante nos restantes. Os valores para a calibração da porosidade são 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 e foram escolhidos com uma avaliação visual do manto principal do modelo em estudo e considerando estudos anteriores (Patricio, 2012; Mestre, 2014; Higuera, 2015). Os coeficientes de resistência são mantidos constantes em todos os mantos nesta calibração de porosidade. Na Tabela 5.4 estão apresentados os valores usados para cada manto nos ensaios da calibração de n do MP. Os resultados obtidos nos quatro ensaios são apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10 de forma a ser possível uma comparação entre cada porosidade usada. No Anexo 2 encontram-se os resultados da análise estatística.

Tabela 5.4. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do manto principal

	n				α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.3	0.35	0.4	0.45	100	0.7	0.34	0.053
MS	0.35				100	1.1	0.34	0.030
MSi	0.35				100	1.1	0.34	0.022
Núcleo	0.25				100	1.1	0.34	0.013

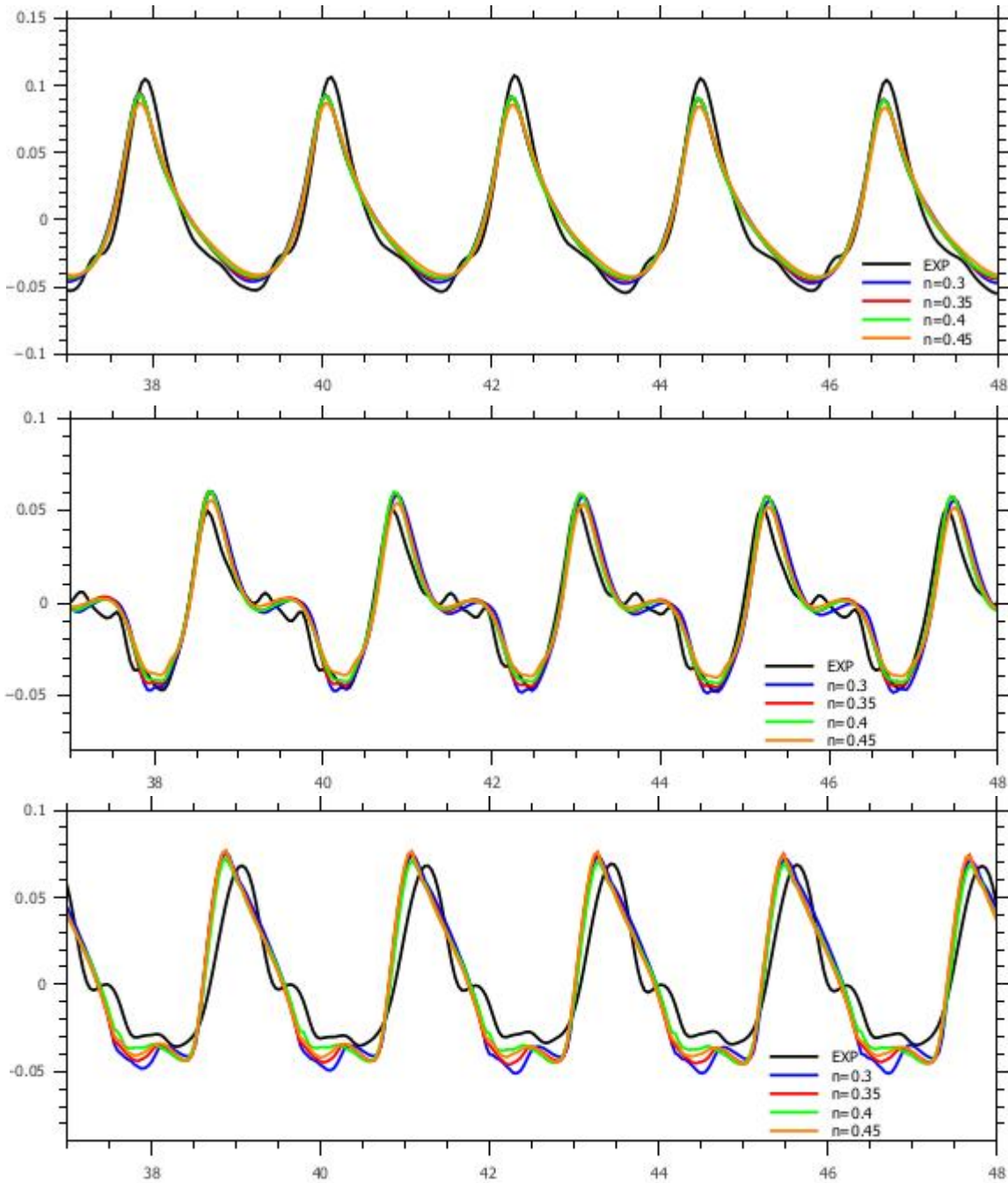


Figura 5.9. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente)

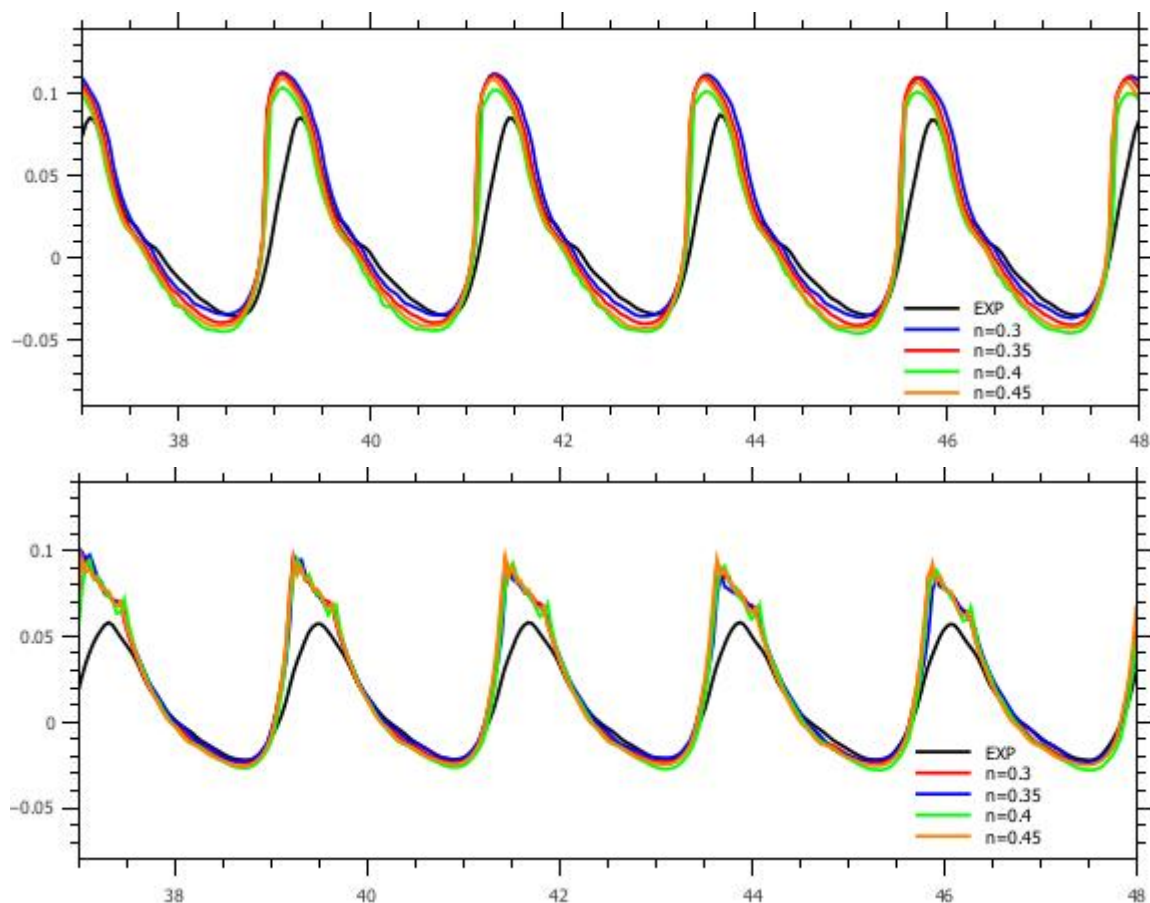


Figura 5.10. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 9 e 10 (de cima a baixo, respetivamente)

Analisando as figuras e os resultados da análise estatística pode-se afirmar que os valores inicialmente estipulados permitem uma boa coincidência com os dados experimentais, tendo um IC de 0.96 a 0.97. Observa-se uma boa coincidência fora da zona porosa (sonda 6 e 7). Percebe-se que com uma elevada porosidade ($n=0.45$) a onda tem mais facilidade em passar pelo quebramar diminuindo a reflexão e criando uma elevação da onda inferior a montante. Mesmo assim, os valores do IC são de aproximadamente 0.97-0.99 para todas as porosidades testadas. A Sonda 8, que está localizada dentro da zona porosa, já tem uma maior diferença entre os ensaios e os dados experimentais. Observa-se que o refluxo tende a ter uma altura maior com a diminuição da porosidade. Na sonda 9 verifica-se uma sobre elevação, com um espraiamento excessivo com todas as porosidades. A sonda 10 (Figura 5.10) demonstra um comportamento pouco real, a amplitude é sobrestimada e mantém-se no ponto mais alto da elevação, tendo dificuldade em baixar. A altura e o tempo exagerado da elevação da água deve-se à falta de permeabilidade da zona porosa dos mantos e do núcleo (Hald, 1998). No geral, analisando os gráficos e os dados estatísticos, adotou-se por $n = 0.4$ para o valor da porosidade do manto principal.

5.4.2.2 Manto secundário

Como já referido, variou-se a porosidade do manto secundário e do manto secundário interior em simultâneo. As porosidades nos MS/MSi tomam os valores 0.25, 0.3, 0.35 e 0.4 e é feita uma análise da mesma forma que no manto principal. Na Tabela 5.5 são apresentados os valores usados nos quatro ensaios que seguem. As Figuras 5.11 e 5.12 representam a elevação de superfície e no Anexo 2 encontra-se o resumo da análise estatística.

Tabela 5.5. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do manto secundário

	n				α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.4				100	0.7	0.34	0.053
MS	0.25	0.3	0.35	0.4	100	1.1	0.34	0.030
MSi	0.25	0.3	0.35	0.4	100	1.1	0.34	0.022
Núcleo	0.25				100	1.1	0.34	0.013

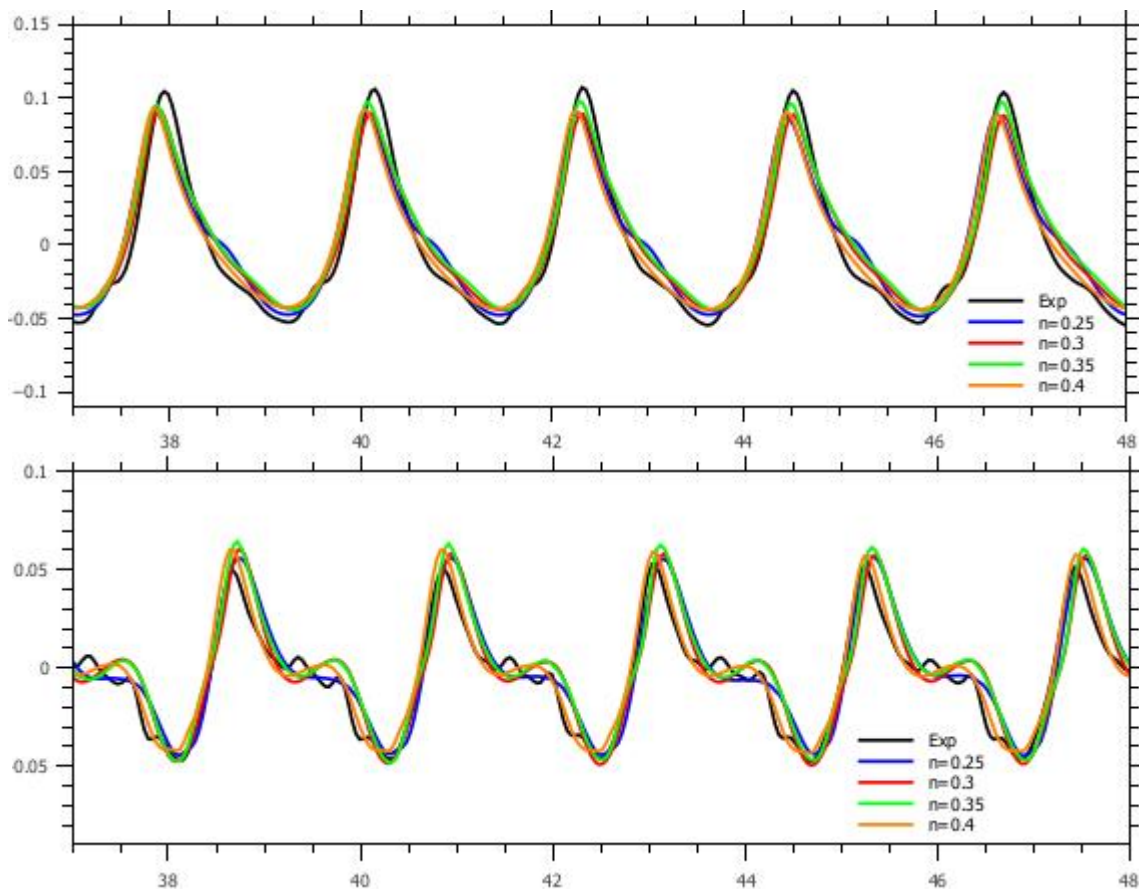


Figura 5.11. Comparação entre as diferentes porosidade e dados experimentais, Sonda 6 e 7 (de cima a baixo, respetivamente)

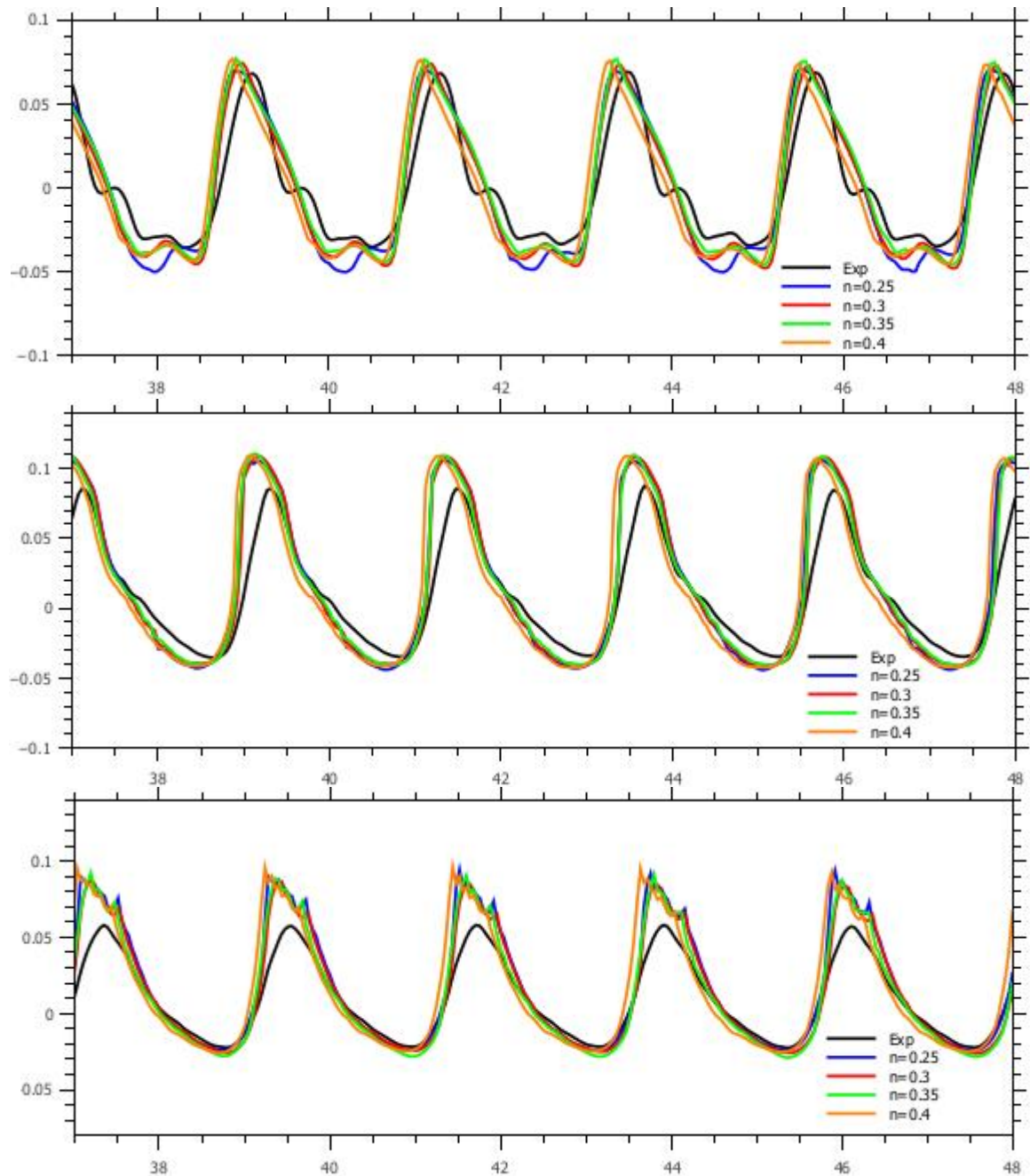


Figura 5.12. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 8 a 10 (de cima a baixo, respetivamente)

Entende-se que a simulação com muita pouca porosidade ($n=0.25$) do manto secundário se distancia mais dos resultados experimentais. Os resultados para a sonda 6 e 7 para porosidades de 0.25 e 0.3 não melhoram o resultado. O aumento da reflexão é bem visível na Figura 5.11 (sonda 6) no ensaio com $n=0.25$. Os resultados para porosidade de 0.35 e 0.4 aproximam aos dados do experimentais, sendo a maior porosidade que permite a melhor aproximação com um

IC de 0.99. Na sonda 8 as simulações mostram melhores resultados para uma gama de $n = 0.3-0.35$. As sondas 9 e 10 mostram uma melhor convergência com os resultados experimentais, com o aumento da porosidade, facilitando o escoamento interno do quebra-mar.

Comparando todos os resultados destes ensaios, adotou-se a porosidade de 0.4 para o manto secundário. Sabe-se que é necessário aumentar a resistência neste manto, mas o comportamento da onda fora do quebra-mar é muito próximo da realidade.

5.4.2.3 Núcleo

A última zona do quebra-mar a ser calibrada é o núcleo, a qual também é a maior zona porosa, tendo uma grande influência sobre a transmissão da onda pelo quebra-mar. São testadas 4 porosidades para o núcleo e considerando que o núcleo é o menos permeável, utilizaram-se valores de 0.2 a 0.35. Na Tabela 5.6 são representados os valores usados nos quatro ensaios que se seguem. As figuras representam a elevação de superfície e o Anexo 2 resume a análise estatística.

Tabela 5.6. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do núcleo

	n				α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.4				100	0.7	0.34	0.053
MS	0.4				100	1.1	0.34	0.030
Msi	0.4				100	1.1	0.34	0.022
Núcleo	0.2	0.25	0.3	0.35	100	1.1	0.34	0.013

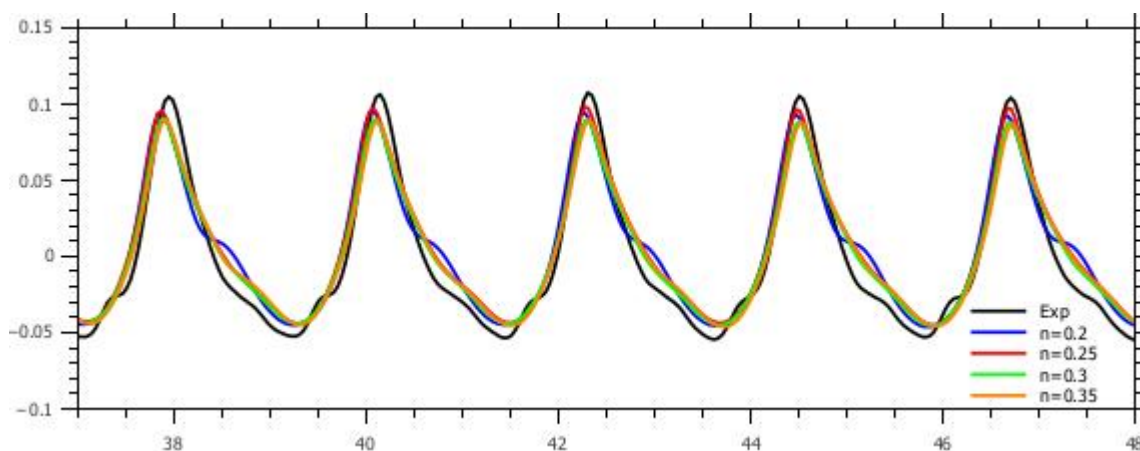


Figura 5.13. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 6

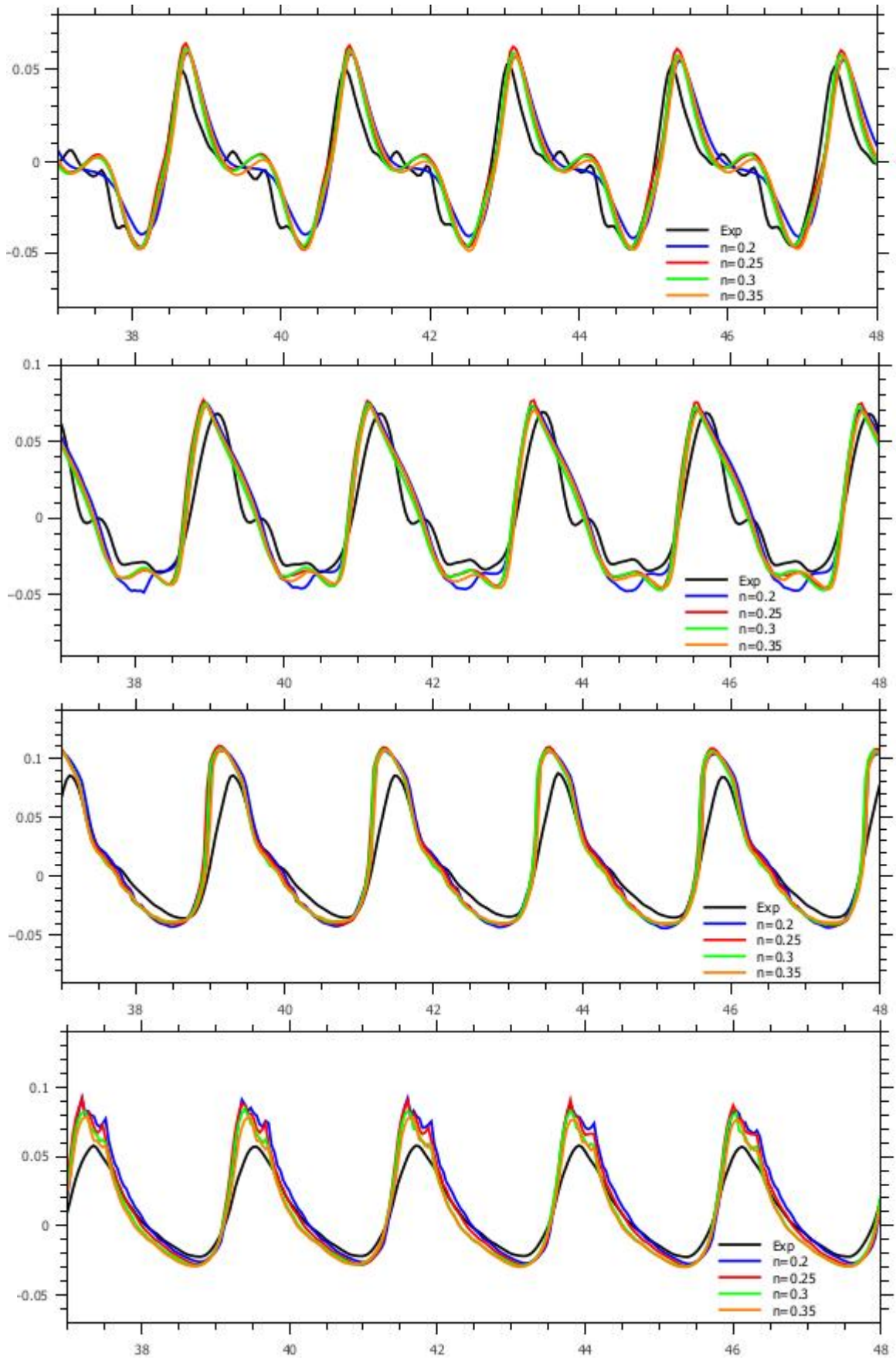


Figura 5.14. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 7 a 10 (de cima a baixo, respetivamente)

Fora da zona porosa, o comportamento continua a ser bem representado com índices de concordância na gama de 0.98-0.99. As simulações de melhor desempenho fora do quebra-mar são para valores de n de 0.25 e 0.3, perdendo qualidade com o afastamento destes valores. Com a diminuição de n , a reflexão é mais intensa, como visto na calibração do manto secundário e voltou-se a verificar agora. Na sonda 8, observa-se que com uma porosidade de 0.35 a elevação máxima é bem aproximada e permite um IC de 0.97. A sonda 9 continua a captar uma elevação exagerada em relação aos dados experimentais. A sonda 10 mostra a maior variação entre os valores, melhorando com o aumento da porosidade. Comparando os dados estatísticos e analisando os gráficos, é possível afirmar que $n=0.35$ para o núcleo é a melhor solução, visto que com o aumento da porosidade os resultados simulados convergem com os experimentais. A Tabela 5.7 mostra os valores determinados para a porosidade para cada camada porosa.

Tabela 5.7. Valores obtidos para a porosidade depois da calibração

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
Manto principal	0.4	100	0.7	0.34	0.053
Manto secundário	0.4	100	1.1	0.34	0.030
Manto secundário int.	0.4	100	1.1	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1	0.34	0.013

5.4.3 Calibração do coeficiente de resistência não linear, β

Depois de determinar a porosidade, calibram-se os coeficientes de resistência não linear, β de forma a atingir a melhor paridade entre os dados experimentais e os resultados da simulação computacional. O ajuste dos coeficientes permite entender os efeitos que o β têm sobre a elevação da onda e o comportamento do escoamento fora e dentro da zona porosa. Permite entender a ação sobre a reflexão e transmissão da onda, tal como obter uma simulação o mais próximo possível do caso real. A calibração do β tem início com o manto principal, mantendo os restantes valores constantes, usando os valores da Tabela 5.7. De seguida é calibrado o manto secundário e por fim o núcleo, tal como no estudo anterior.

5.4.3.1 Manto principal

Os valores testados para β , do manto principal, seguem a Figura 2.13, de Van Gent. No manto principal é possível determinar o KC, sabendo os parâmetros da onda no pé da estrutura, estima-se assim o valor de β . Os parâmetros da onda no pé do quebra-mar são a altura significativa, H_s , e o período de pico, T_p , obtidos do caso experimental, seguindo as indicações de Jacobsen (Jacobsen, 2015b). Chegou-se à conclusão que é necessário aumentar o coeficiente de β devido ao baixo KC. Na Tabela 5.8 são representados os valores usados nos ensaios e as Figuras 5.15 e 5.16 mostram a elevação da superfície nas sondas 6 a 10, em função do tempo.

Tabela 5.8. Valores dos parâmetros da calibração de β do manto principal

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.4	100	0.7	0.9	1.1	0.34	0.053
MS	0.4	100	1.1			0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.1			0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1			0.34	0.013

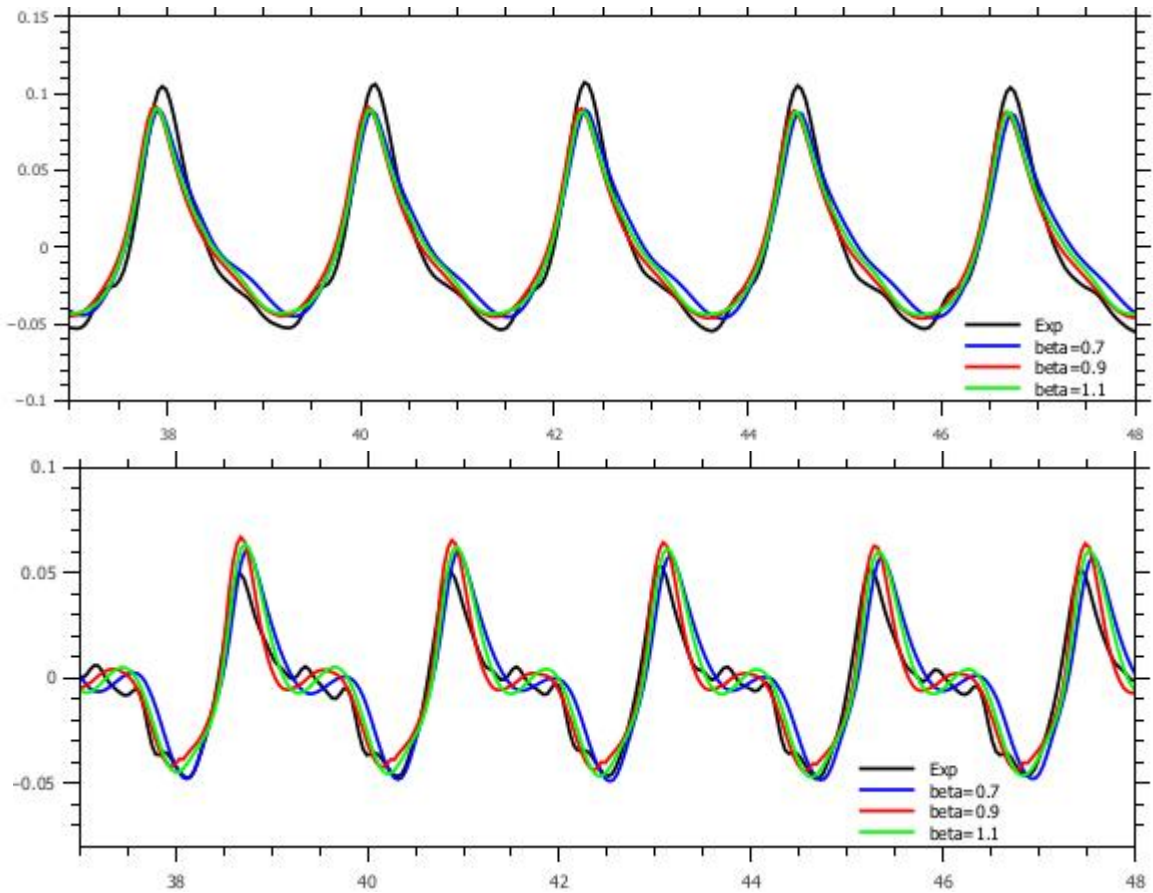


Figura 5.15. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, sonda 6 e 7

(de cima a baixo, respetivamente)

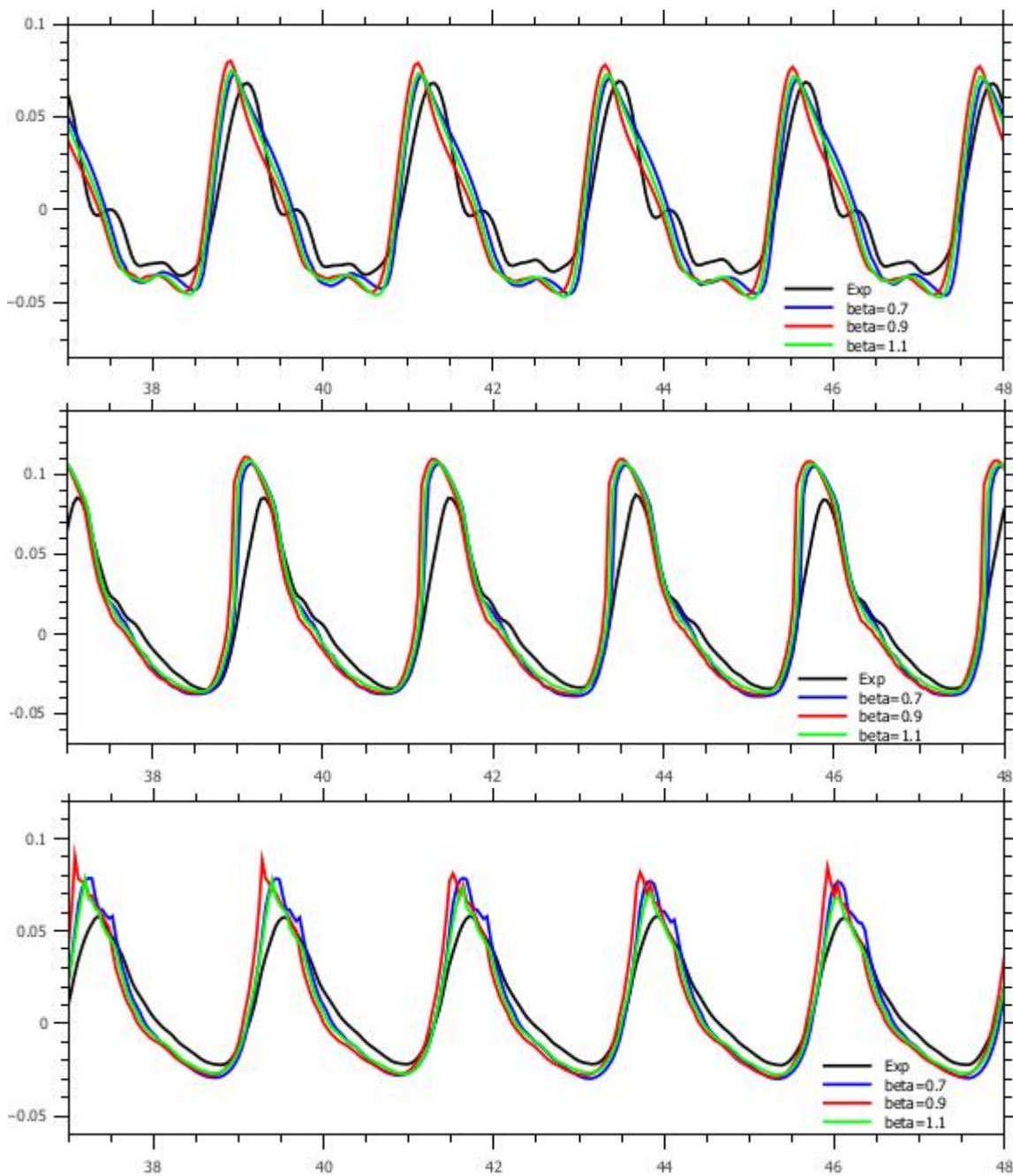


Figura 5.16. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais,
Sonda 7, 8, 9 e 10 (de cima a baixo, respetivamente)

O aumento da resistência ao escoamento na camada exterior manteve o bom comportamento da onda simulada fora da zona porosa, obtendo valores de IC de 0.98-0.99 (sondas 6 e 7). Na sonda 6 a onda continua a ser subestimada e na sonda 7 sobre-estima. As sondas 8 e 9 não demonstram um melhoramento substancial do comportamento da onda. A localização das sondas 8 e 9 é numa parte do domínio, com alguns vórtices e com fortes acelerações. Mesmo assim, a análise estatística mostra que a elevação da superfície é bem representada, com IC na ordem dos 0.97-0.98. A sonda 10 melhorou com o aumento de β , mostrando na Figura 5.16 um perfil mais

regular e observa-se uma redução da sobre elevação. Com $\beta=1.1$ chega-se a valores de IC perto dos 0.988, o que implica um comportamento praticamente idêntico ao caso real. O aumento da resistência teve um resultado positivo sobre o comportamento da onda fora e dentro da zona porosa. O valor determinado para o coeficiente não linear é $\beta=1.1$ para a camada exterior do quebra-mar.

5.4.3.2 Manto secundário

Segue-se a calibração de β para o manto secundário, no qual se recorreu novamente ao gráfico de Van Gent (Figura 2.13) e entendeu-se que irá haver um aumento da resistência devido à diminuição da velocidade nesta zona. Neste caso é muito complicado determinar ou estimar o KC. Visto que a velocidade é menor que no caso de Patricio (2012), entendeu-se que KC diminui, aumentando assim o β . Os valores testados são 1.1, 1.5 e 2.0. Tabela 5.9 mostra os valores usados nos ensaios e as Figuras 5.17 e 5.18 mostram a elevação da onda ao longo do tempo em cada uma das sondas.

Tabela 5.9. Valores dos parâmetros da calibração de β do manto secundário

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.4	100	1.1			0.34	0.053
MS	0.4	100	1.1	1.5	2.0	0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.1	1.5	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1			0.34	0.013

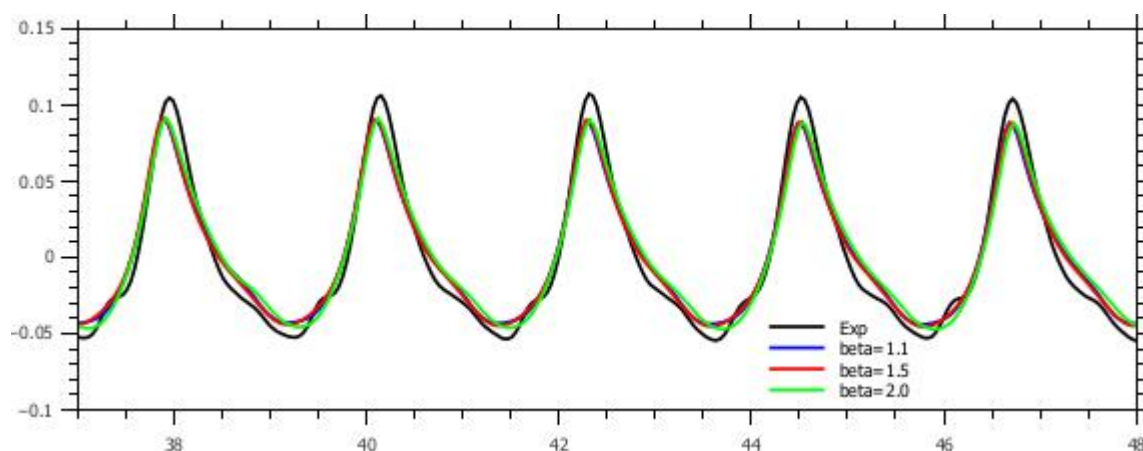


Figura 5.17. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 6

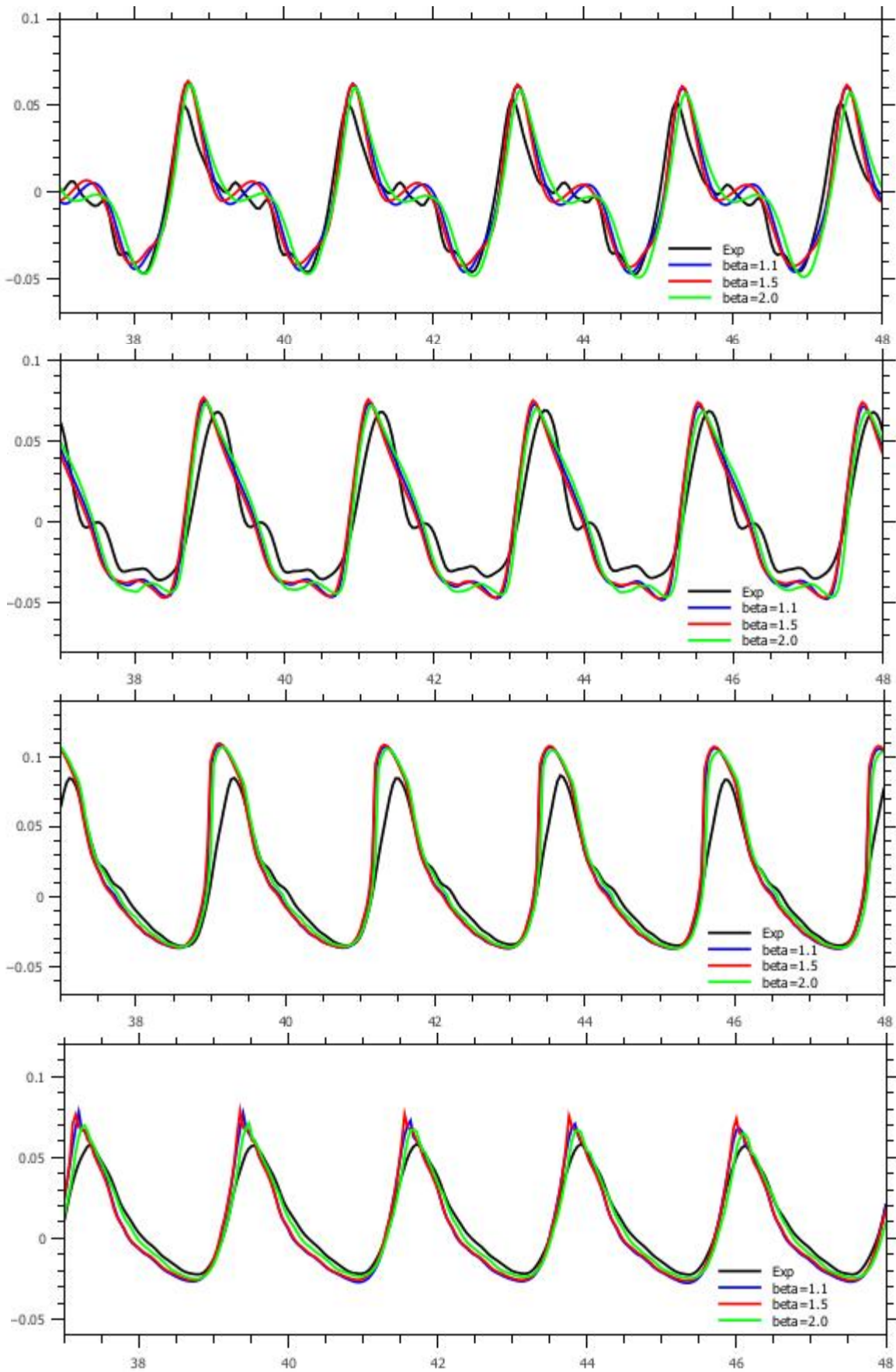


Figura 5.18. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 7 a 10 (de cima a baixo, respetivamente)

Os ensaios com os maiores coeficientes de resistência do manto secundário demonstram o melhor desempenho do código fora do quebra-mar nas sondas 6 e 7. Na sonda 8, o comportamento varia consoante o valor de β , sem melhorar muito com a variação. Para $\beta=1.5$ existe uma aproximação e para $\beta = 2.0$ um afastamento dos dados experimentais consuante os valores estatísticos. Mas analisando a Figura 5.18 e tomando em conta a amplitude máxima e a depressão da onda simulada, percebe-se que a simulação com o melhor desempenho é com $\beta=2.0$. O perfil continua a não ser idêntico mas permite aproximar os valores extremos da onda. Na sonda 9 observa-se que a onda simulada com o maior valor para o coeficiente da resistência, β , não tem uma amplitude tão elevada como os outros ensaios e aproxima-se mais ao perfil. Isto pode ser devido a resistência do manto na elevação da onda. O mesmo se verifica para a sonda 10, a qual apresenta um IC de 0.99 e uma elevação muito próxima da realidade. O escoamento interno está a ser muito bem representado, evitando acumulação e permitindo uma transmissão de onda pelo quebra-mar, próximo da realidade. Comparando os gráficos e os dados estatísticos, adotou-se por usar $\beta=2.0$. no manto secundário.

5.4.3.3 Núcleo

Depois de determinados os parâmetros do meio poroso para os dois mantos exteriores, calibra-se agora o núcleo. Devido à dificuldade em estimar os valores do coeficiente β optou-se por testar um valor para o coeficiente maior e um menor do que o usado na calibração anterior. De forma a entender se é necessário mais ou menos resistência dentro do quebra-mar, testaram-se os valores 0.9, 1.1 e 1.3, para os ensaios do ajuste de β do núcleo. Na Tabela 5.10 estão representados os valores usados para o meio poroso, nas Figura 5.19 e Figura 5.20 apresentam-se os gráficos obtidos e no Anexo 2 os resultados estatísticos.

Tabela 5.10. Valores dos parâmetros da calibração de β do núcleo

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.4	100	1.1			0.34	0.053
MS	0.4	100	2.0			0.34	0.030
MSi	0.4	100	2.0			0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	0.9	1.1	1.3	0.34	0.013

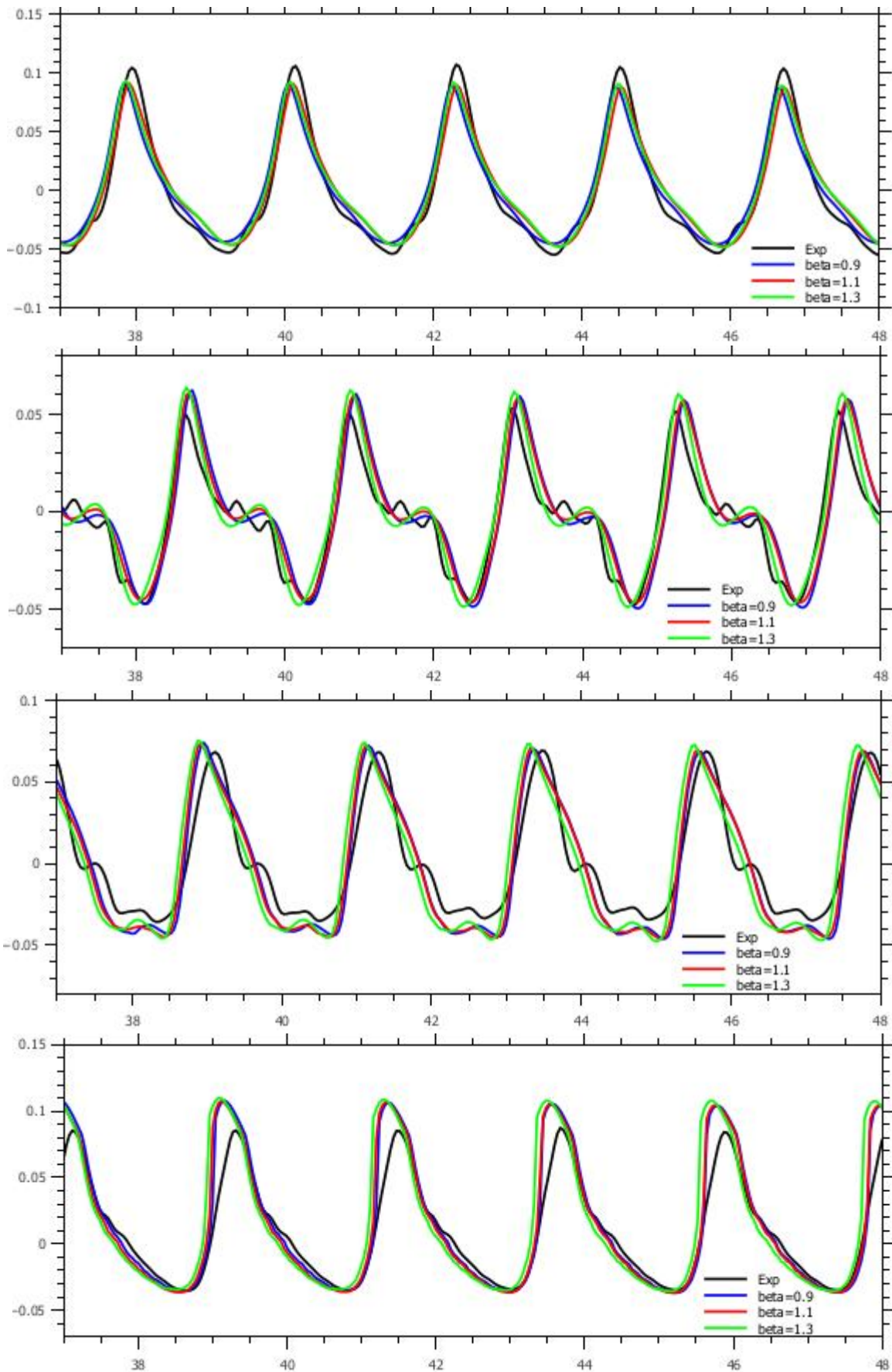


Figura 5.19. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente)

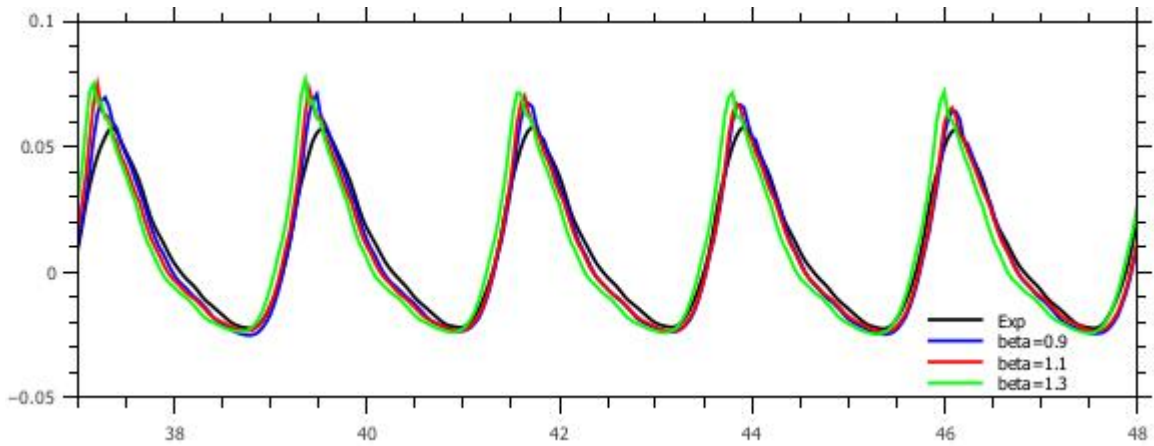


Figura 5.20. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, sonda 10

A montante do quebra-mar continua-se a observar uma boa aproximação aos dados experimentais. Na sonda 6 mantém-se a subestimação da elevação da onda e na sonda 7 é visível que o aumento de β tem como consequência o aumento da amplitude da onda, de forma a sobrestimá-la. Isto é consequência do aumento da reflexão e da diminuição da transmissão pelo quebra-mar. O mesmo observa-se na sonda 8, 9 e 10. O aumento de β no núcleo cria um afastamento dos dados experimentais, criando sobre elevações excessivas. Neste ensaio observou-se que com os valores usados já se atingiu uma solução próxima, em termos de aproximação aos dados experimentais. O melhor desempenho apresentado é com o β igual a 1.1.

Os valores para os parâmetros do meio poroso determinados pela calibração que permitem a maior aproximação aos dados experimentais são apresentados na Tabela 5.11. Na figura 5.21 representa-se o espriamento da simulação com a melhor paridade com os dados experimentais.

Tabela 5.11. Valores obtidos para os parâmetros do meio poroso depois da calibração

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.4	100	1.1	0.34	0.053
MS	0.4	100	2.0	0.34	0.030
MSi	0.4	100	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1	0.34	0.013



Figura 5.21. Imagem da simulação com a melhor paridade com os dados experimentais

5.4.4 Discussão de resultados

Os valores iniciais adotados foram inspirados nos valores sugeridos por Patricio (2012), que realizou os estudos com uma altura de onda de 4 m à escala de protótipo e a onda simulada neste estudo é de 2.5 m, o que influencia o comportamento do escoamento no meio poroso. Um outro ponto importante é diferenças entra a formulação das equações VARANS usadas no código IH2VOF (Lara, 2008) e o IHFOAM (Higeura, 2015). A variação de um parâmetro de onda tem uma forte ação sobre a resposta do meio poroso. A calibração dos parâmetros do meio poroso permitiu atingir um índice de concordância médio das cinco sondas de 0.982; o IC com os valores iniciais é de 0.959. Na sonda 10 foi possível atingir valores de IC 0.99 e permitiu representar a elevação de superfície livre, com perfil semelhante ao medido experimentalmente (Didier et al., 2014). Com a calibração obteve-se valores que permitem uma boa paridade entre os dados obtidos experimentalmente e os resultados numérico do *OpenFOAM*.

Os ensaios mostram que os valores iniciais ofereciam demasiada resistência ao escoamento, resultando na reflexão excessiva da onda e uma transmissão interna da onda diminuída. Com a calibração foi possível melhorar o comportamento da superfície livre simulada dentro do meio poroso, já que a montante da estrutura o comportamento da onda foi geralmente bem representado. A maior influência dos parâmetros foi observada nas sondas posicionadas dentro do quebra-mar. As sondas 8 e 9 estão posicionadas em parte do domínio com um escoamento muito complexo. Sendo que a sonda 8 está colocada numa zona de interface entre o nível médio da água e o manto exterior, nesta zona existem alguns vórtices, fortes acelerações e é muito difícil simular o movimento da água. Nesta zona ocorre que, a onda incidente já está a elevar a água fora do quebra-mar, enquanto a superfície livre dentro do manto principal está ainda em movimento descendente. A superfície da água cria uma descontinuidade na interface da zona porosa e não porosa (Figura 5.22), tendo uma elevação externa e interna do meio poroso com velocidades diferentes, aumentando assim a resistência ao escoamento na interface e necessitando de um refinamento adicional.

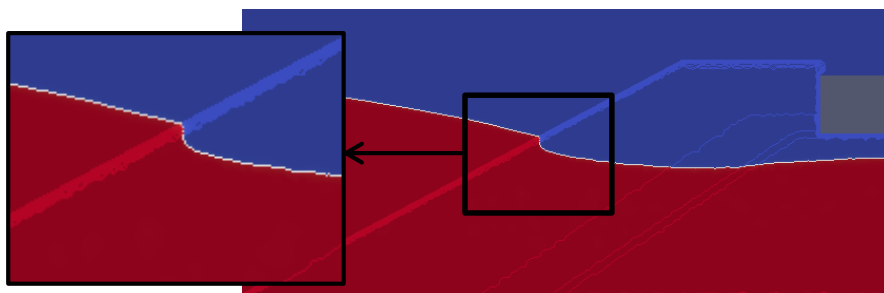


Figura 5.22. Descontinuidade de superfície livre na interface poroso-não poroso.

As acelerações e as turbulências geram-se devido à incidência do espraçamento com o refluxo (Hald, 1998) e o código tem dificuldade em simular este fenómeno, visto que os gradientes são muito grandes. Adicionalmente o ar coloca-se por baixo da superfície livre e apenas pode escapar em direção ao topo do domínio. Na realidade o ar pode escapar lateralmente e para o topo, consoante a região de menor pressão. Adicionalmente, o ar é considerado como incompressível uma vez que na realidade o ar é compressível. A elevação na sonda 9 foi sempre sobrestimada, o que pode ser o resultado da definição da interface da zona porosa. No caso real, a superfície do quebra-mar é irregular devido as saliências das pedras que aumentam a resistência ao escoamento durante do espraçamento. No domínio computacional, o meio poroso é limitado por linhas retas sem aumento de resistência na interface. A sonda 10 mostra um comportamento melhorado com a calibração, atingindo uma ótima aproximação do perfil da onda simulada. O fenómeno da acumulação de água inicialmente simulado dentro do quebra-mar, que na realidade não ocorria, foi eliminado pela calibração dos parâmetros do meio poroso.

Pode-se afirmar que a calibração melhorou o desempenho do código, simulando uma elevação de onda muito próxima da experimental. Demonstrou-se a necessidade de calibração para obter resultados de qualidade em problemas de escoamento com zonas porosas. Na Figura 5.23 está representada uma comparação entre o melhor e o pior ensaio. Nas últimas imagens da Figura 5.23 observa-se a dificuldade da água em descer pelo meio poroso referido na calibração.

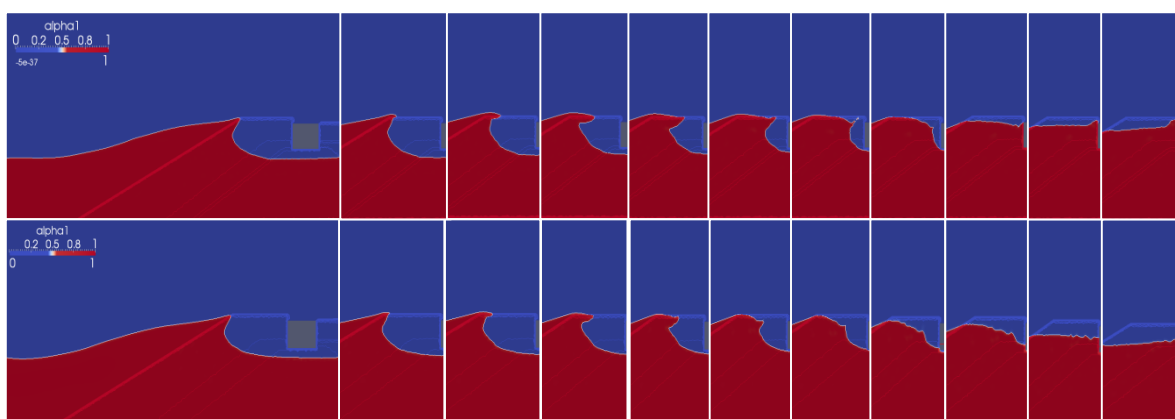


Figura 5.23. Representação da onda incidente antes (cima) e depois (baixo) da calibração dos parâmetros

5.5 Interação de ondas com um quebra-mar poroso com galgamento

Neste sub-capítulo da dissertação são calibrados os parâmetros do meio poroso para a interação de onda-quebra-mar com uma altura de onda de 3.3 m à escala de protótipo, que implica a ocorrência de galgamento. A calibração é feita com o mesmo método utilizado da secção 5.4.1. Adicionalmente são estudados os fenómenos hidrodinâmicos e é validado o *IHFoam* para a interação de onda-quebra-mar com galgamento e a ferramenta *Swak4Foam* é usada para determinar o volume de água galgada. Os resultados numéricos são comparados com os resultados da superfície livre em função do tempo obtidos experimentalmente.

5.5.1 Calibração dos parâmetros do meio poroso

A calibração inicia-se com a porosidade de cada manto e depois segue-se o ajuste do coeficiente de resistência não linear β mantendo sempre o coeficiente linear α constante. Os parâmetros do meio poroso determinados anteriormente e representados na Tabela 5.11, são usados como valores de referência inicial e depois são modificados. Na Tabela 5.12 são resumidos todos os parâmetros do Manto Principal (MP), Manto Secundário (MS), Manto Secundário interior (MSi) e Núcleo, testados nesta calibração.

Tabela 5.12. Valores utilizados na calibração dos parâmetros do meio poroso

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.35, 0.4, 0.45	100	0.9, 1.1, 1.3	0.34	0.053
MS	0.35, 0.4, 0.45	100	1.8, 2.0, 2.2	0.34	0.030
MSi	0.35, 0.4, 0.45	100	1.8, 2.0, 2.2	0.34	0.022
Núcleo	0.3, 0.35, 0.4	100	0.9, 1.1, 1.3	0.34	0.013

5.5.2 Calibração da porosidade

5.5.2.1 Manto principal

Iniciou-se a calibração da porosidade com o manto principal, mantendo a porosidade constante nos restantes mantos. Os valores para a porosidade do manto principal são 0.35, 0.4, 0.45. De forma a entender os efeitos do β escolheu-se um valor acima do valor 0.4 (determinado na secção 5.4) e um abaixo. Deste modo, entende-se o sentido da calibração, se é preciso mais ou menos resistência para este manto. Os coeficientes de resistência são mantidos constantes em todos os mantos durante a calibração de porosidade. Na Tabela 5.13 apresentam-se os valores usados para cada manto nos ensaios da calibração de n do MP. Os resultados obtidos da elevação da superfície livre em função ao tempo são apresentadas nas Figuras 5.24, 5.25, 5.26 e do volume galgado por metro de largura do quebra-mar em função ao tempo na Figura 5.27

Tabela 5.13. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do manto principal

	n			α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.35	0.4	0.45	100	1.1	0.34	0.053
MS	0.4			100	2.0	0.34	0.030
MSi	0.4			100	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.35			100	1.1	0.34	0.013

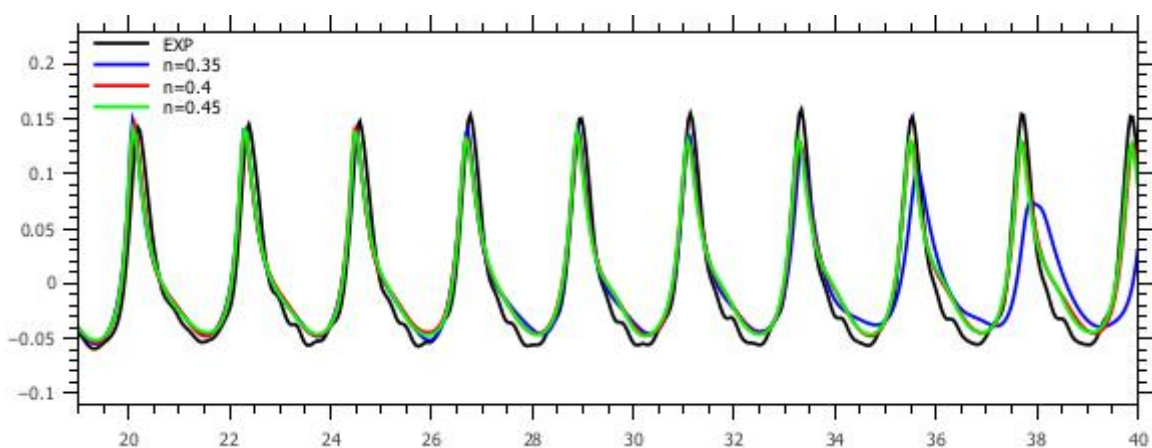


Figura 5.24. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 6

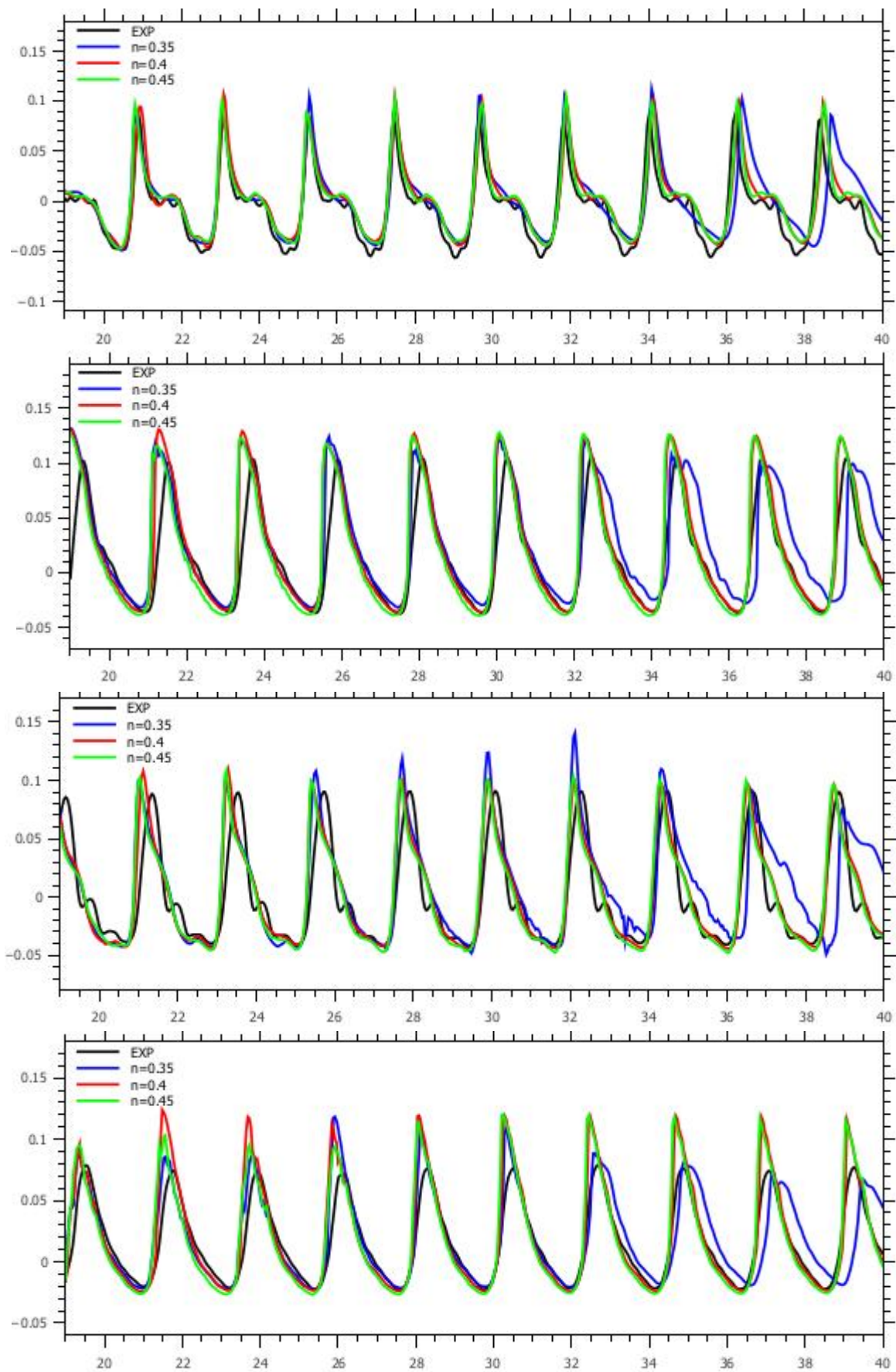


Figura 5.25. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 7 a 10 (de cima a baixo, respetivamente).

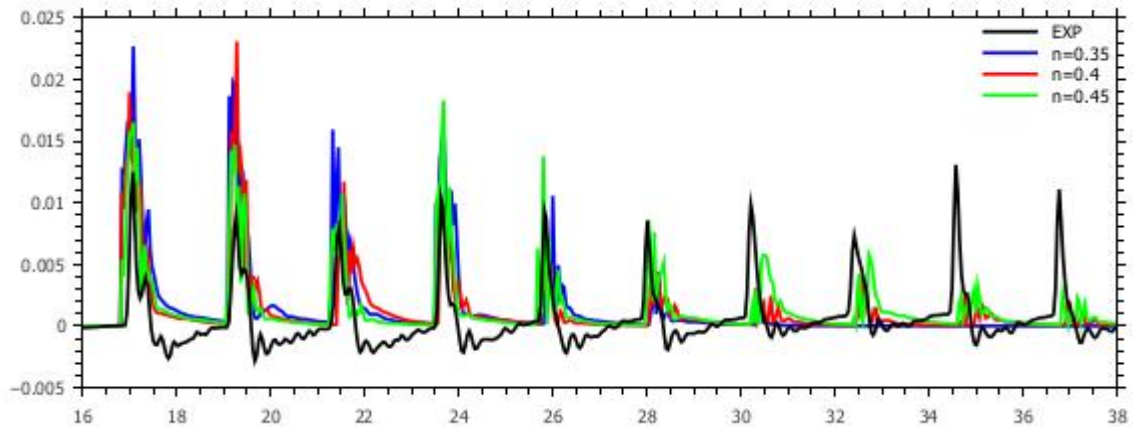


Figura 5.26. Comparação entre as diferentes porosidades e dados experimentais, Sonda 11.

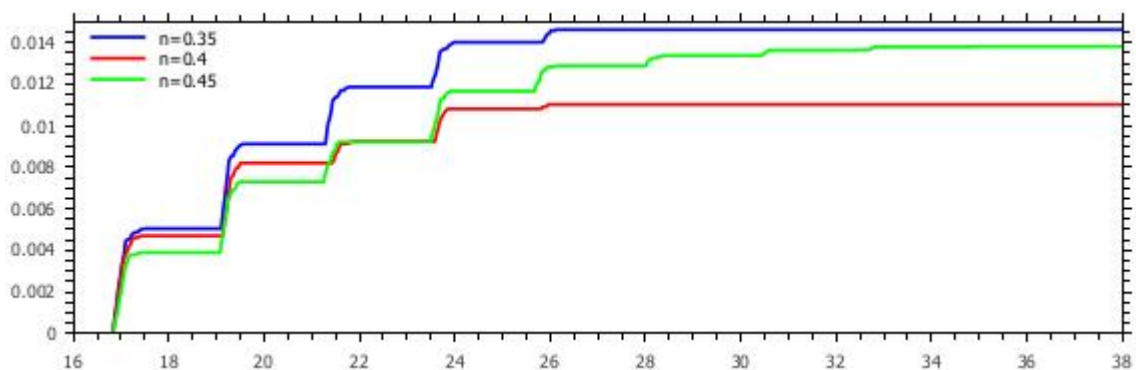


Figura 5.27. Comparação do volume galgado por metro com diferentes porosidades

Na Figura 5.25 observa-se que a diminuição da porosidade ($n=0.35$) cria uma reflexão excessiva na estrutura. Este efeito diminui a amplitude da onda incidente e altera o seu período no instante $t=36s$. Para $\beta = 0.4$ e 0.45 a onda é bem simulada. Na sonda 7 verifica-se novamente a ligeira sobre-estimação da elevação da onda. Com $n = 0.45$ o perfil da onda é mais próximo do caso real. É possível entender um aumento do período entre as ondas simuladas e o caso experimental, o que é mais evidente com $n=0.35$. Este efeito tem tendência em aumentar com o tempo da simulação e ocorre com todas as porosidades testadas. Nas sondas 8 e 9, o comportamento da onda é bem representado ($n=0.4$ e $n=0.45$). No núcleo do quebra-mar (sonda 10) a amplitude da onda é muito elevada e observa-se a influência da porosidade do manto exterior sobre o andamento da onda no núcleo. Na sonda 11 observa-se a maior paridade com os dados experimentais com $n = 0.45$, tendo todos os ensaios uma tendência em diminuir a altura da água galgada e aumentarem o período em relação ao caso experimental. Com a porosidade baixa ($n=0.35$), as primeiras ondas têm um galgamento muito intenso e depois diminuem fortemente. Nos outros dois ensaios também se verifica esta atenuação, mas de forma mais gradual, sendo no ensaio com $n = 0.45$ o galgamento têm melhor correspondência aos dados experimentais.

5.5.2.2 Manto secundário

Determinada a porosidade para o manto exterior, segue-se a calibração da porosidade do manto secundário. Para a porosidade do MS/MSi foram testados os valores 0.35, 0.4 e 0.45 e é feita uma análise da mesma forma que no manto principal. A Tabela 5.14 apresenta os valores da calibração para os mantos secundários. As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam a elevação da onda simulada em função ao tempo e a Figura 5.30 o volume galgado por metro de largura do quebre-mar em função ao tempo.

Tabela 5.14. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do manto secundário

	n			α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.45			100	1.1	0.34	0.053
MS	0.35	0.4	0.45	100	2.0	0.34	0.030
MSi	0.35	0.4	0.45	100	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.35			100	1.1	0.34	0.013

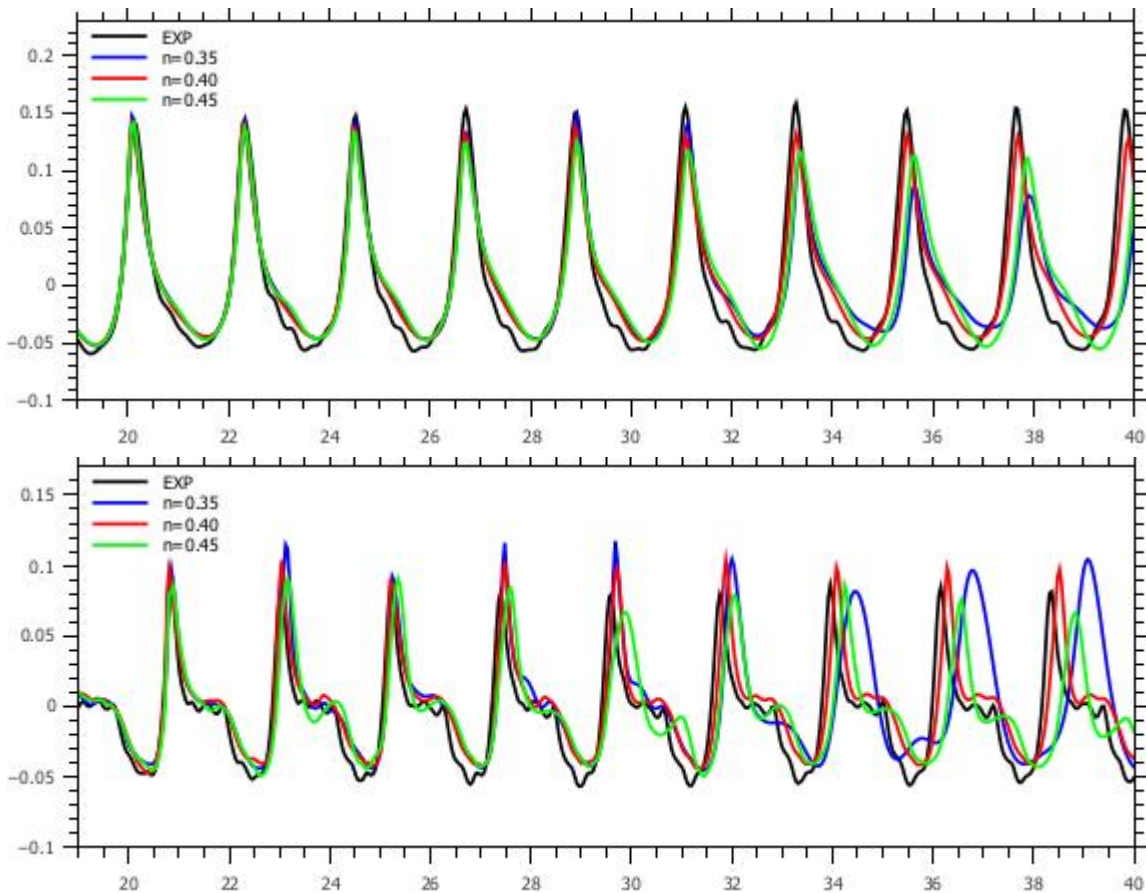


Figura 5.28. Comparação entre as diferentes porosidade e dados experimentais,

Sonda 6 e 7 (de cima a baixo, respetivamente).

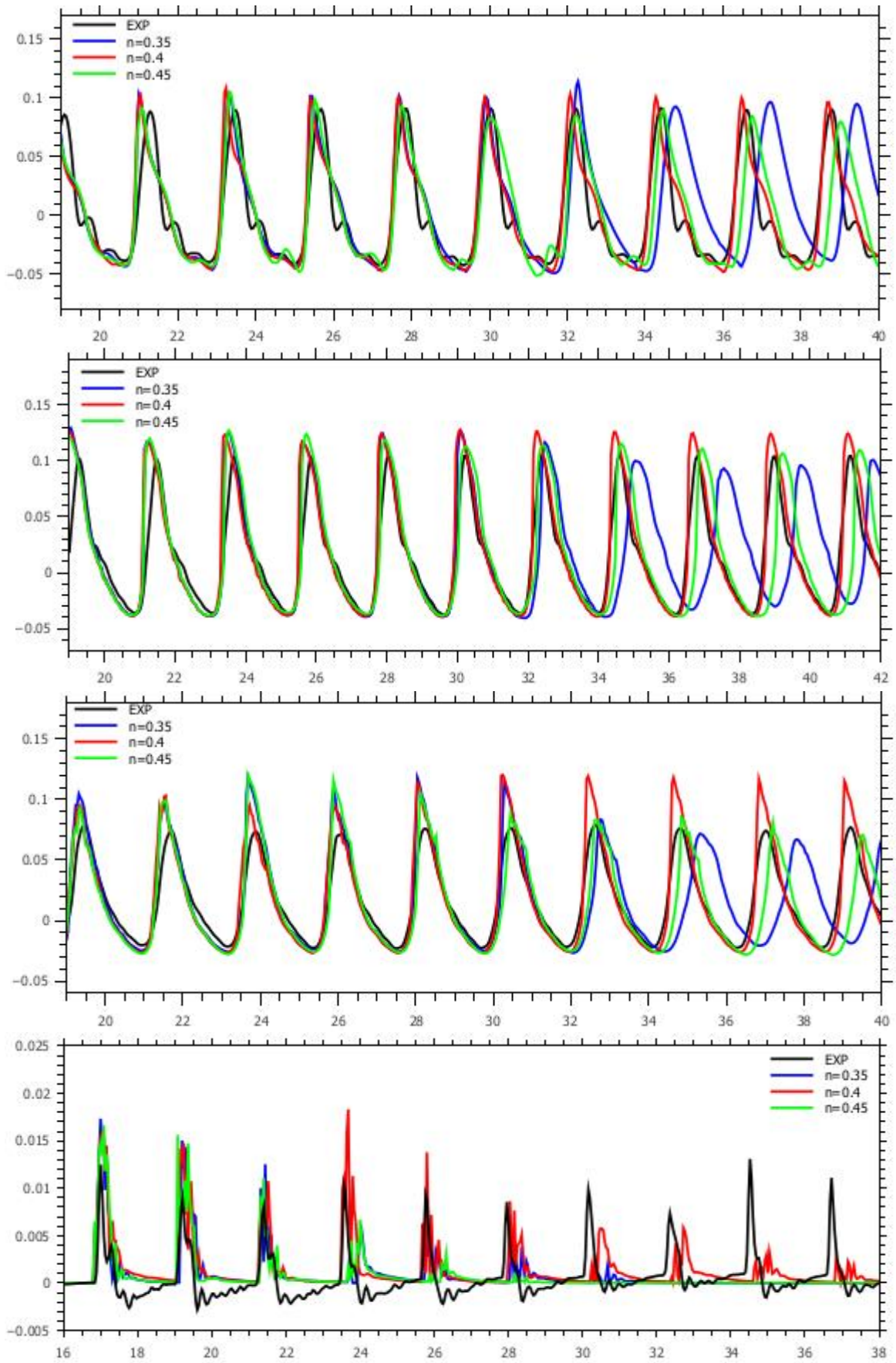


Figura 5.29. Comparação entre as diferentes porosidade e dados experimentais, Sonda 8 a 10 (de cima a baixo, respetivamente).

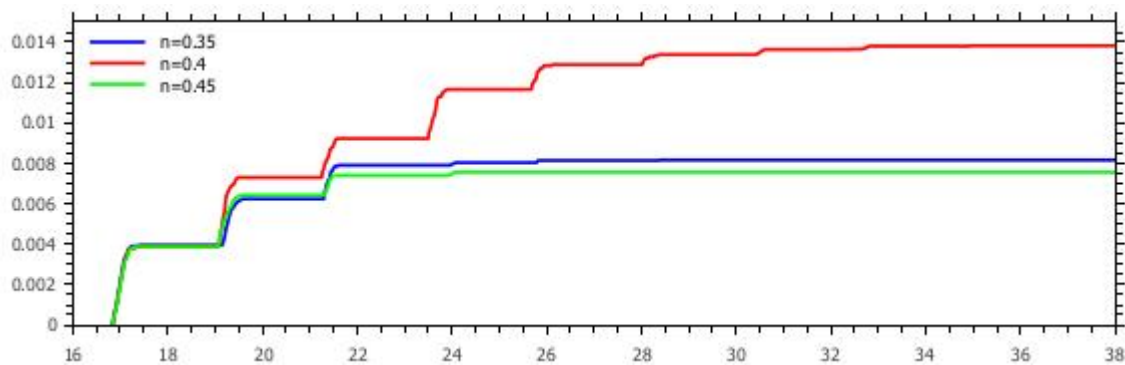


Figura 5.30. Comparação do volume galgado por metro com diferentes porosidades

A redução da porosidade gera os resultados com menos concordância em todas as sondas. Nas sondas 6 e 7, para $n=0.4$ e 0.45 , o perfil da onda é bem representado para os primeiros cinco períodos. A partir do sexto período no ensaio $n=0.45$ é visível um aumento do período, tal como a diminuição de amplitude, o mesmo entende-se nas sondas 8 e 9. Isto deve-se à diminuição da resistência do manto que influencia a forma como a onda é dissipada, refletida e transmitida. Na sonda 10 em $t=32s$, para $n=0.35$ e $n=0.45$ é visível uma perda de altura de onda repentina. Este instante coincide de ausência de galgamento (sonda 11). Observa-se, para $n=0.45$, que primeiro a água não é galgada ($t=28s$) e depois em $t=30s$ é refletida com mais intensidade. Como a onda não perde energia no galgamento, aumenta a reflexão. A altura do galgamento simulada mais próximo aos dados experimentais é o ensaio $n=0.4$. Na sonda 10 entende-se que o aumento da porosidade diminui o galgamento, o que se deve à transmissão para o interior do núcleo. Mas a diminuição da porosidade também tem um galgamento reduzido, o que mostra a dependência do galgamento em relação a reflexão da onda. Observa-se ainda que, nos ensaios com a altura de onda que não gera galgamento a dissipação, reflexão e transmissão da onda não influenciavam a onda com tanta intensidade. O melhor desempenho global do código foi com $n = 0.4$.

5.5.2.3 Núcleo

Em seguida, determina-se o valor para a porosidade do núcleo, o qual é a maior zona porosa. Apesar da energia dissipada e refletida nos mantos primário e secundário, o núcleo tem muita importância na transmissão da energia. Oumeraci (1991) observou que 12% da energia é refletida, 54% é dissipada na camada principal, 23% dissipado na camada secundária e que 10% da energia é transmitida para o núcleo. Na Tabela 5.15 apresentam-se os valores usados nos ensaios que se seguem. As Figuras 5.31 e 5.32 representam a elevação de superfície e a Figura 5.33 o volume galgado por metro por largura do quebra-mar.

Tabela 5.15. Valores dos parâmetros da calibração da porosidade do núcleo

	n			α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.45			100	1.1	0.34	0.053
MS	0.4			100	2.0	0.34	0.030
Msi	0.4			100	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.3	0.35	0.4	100	1.1	0.34	0.013

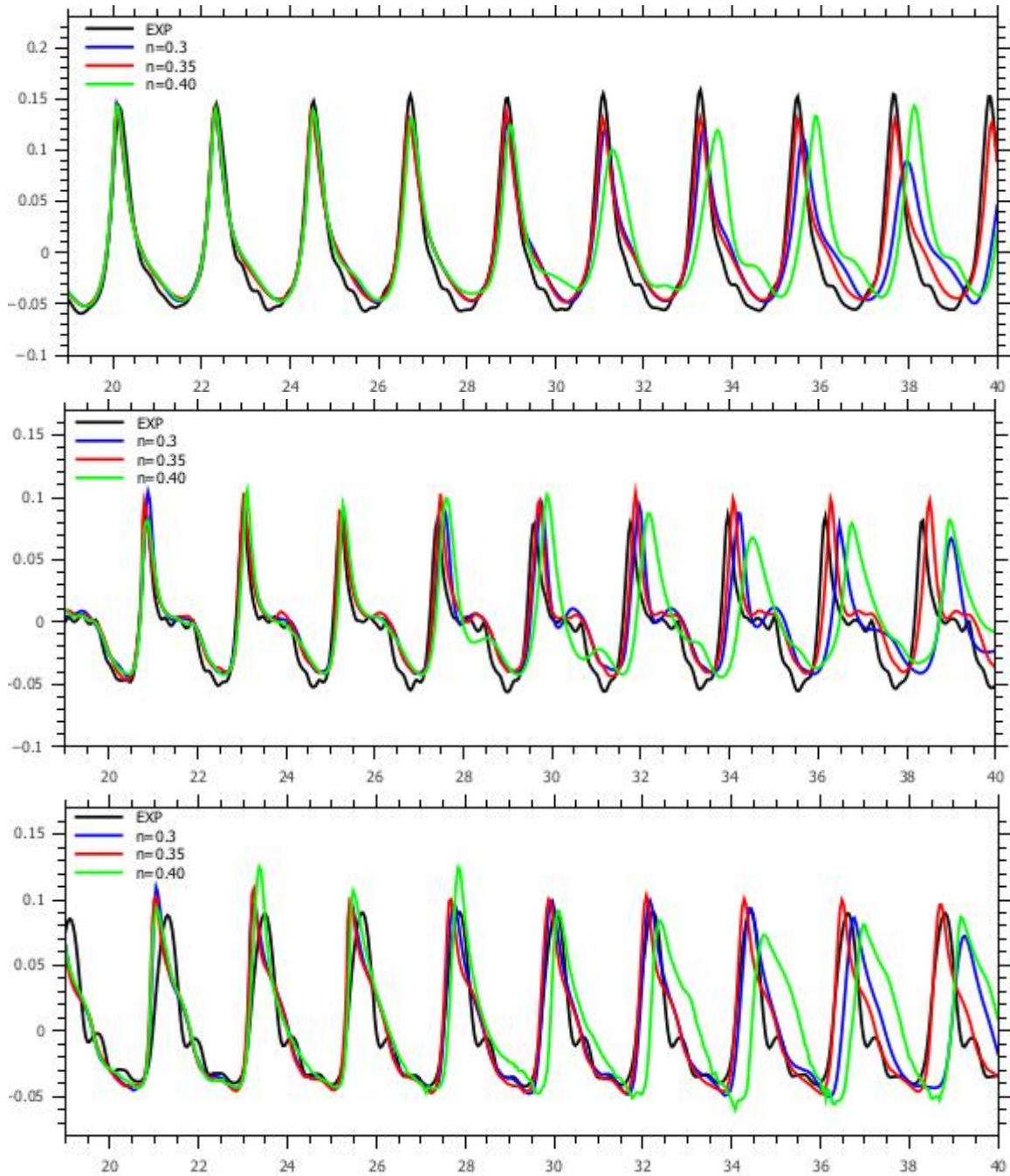


Figura 5.31. Comparação entre as diferentes porosidade e dados experimentais,

Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente)

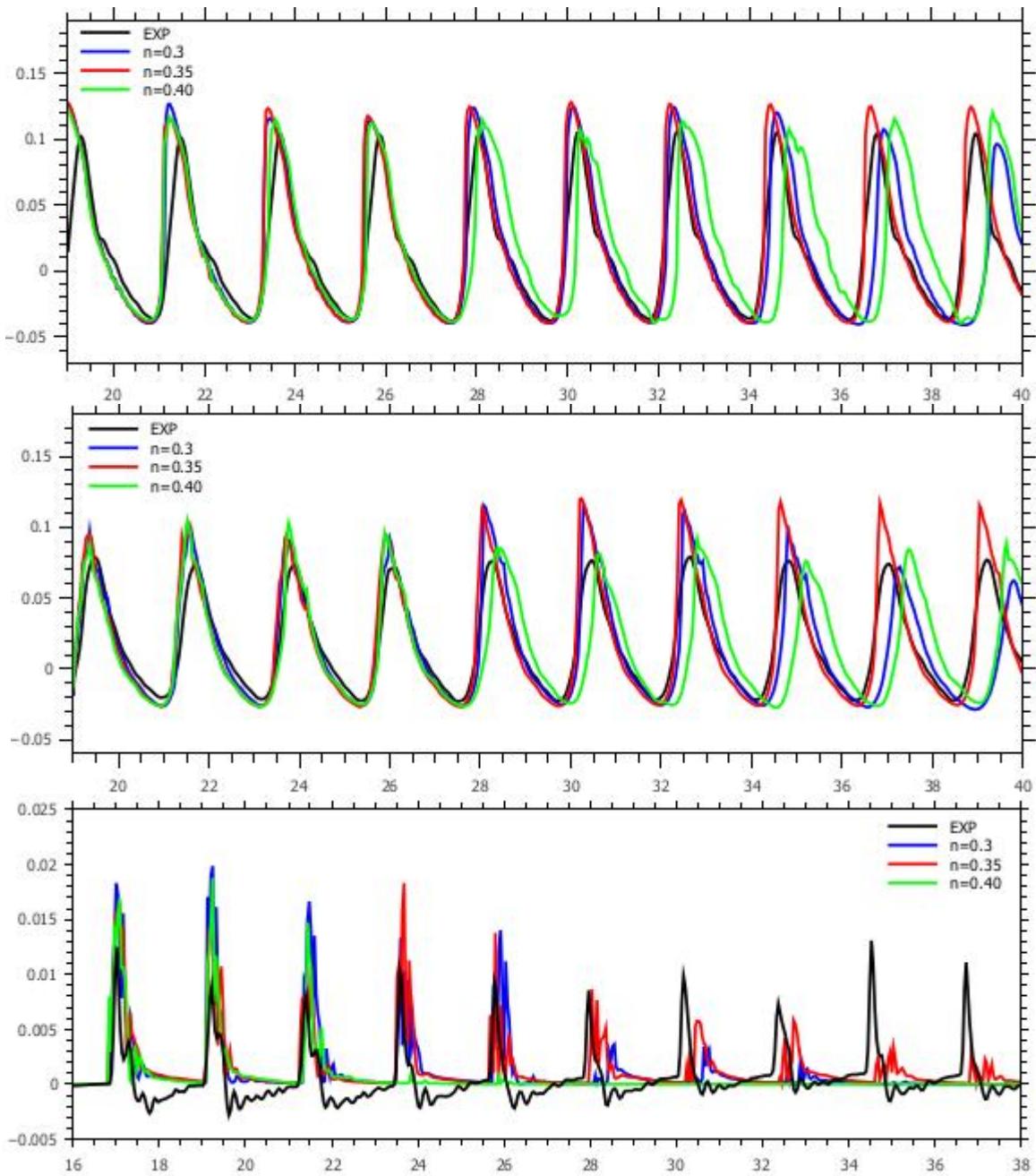


Figura 5.32. Comparação entre as diferentes porosidade e dados experimentais, Sonda 9 a 11 (de cima a baixo, respetivamente).

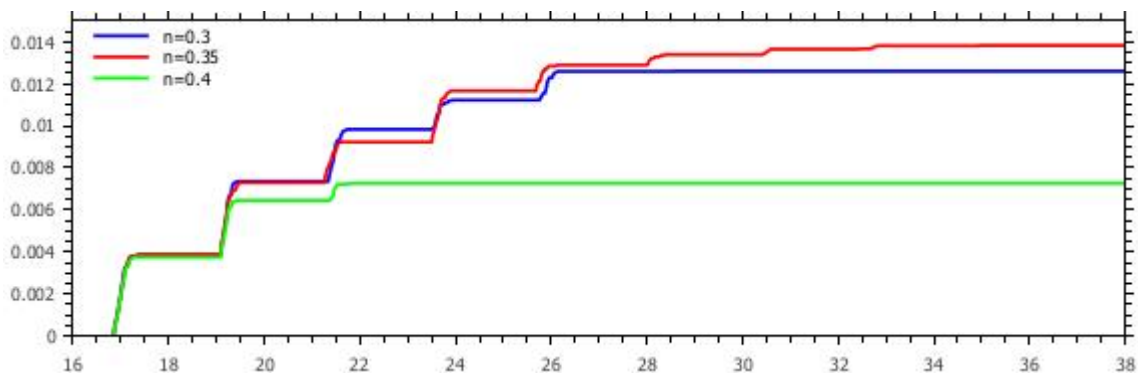


Figura 5.33. Comparação do volume galgado por metro com diferentes porosidades

Nas sondas 6, 7 e 8 percebe-se que o aumento da porosidade afasta os resultados da simulação dos dados experimentais, mas a diminuição tem efeitos semelhantes. No aumento da porosidade, existe maior transmissão, mas a diminuição da porosidade aumenta a dissipação e a reflexão. Volta-se assim a confirmar a dependência da transmissão e da reflexão da onda com a porosidade. Nas sondas 9 e 10, mostram que para $n=0.40$ a altura de onda é bem estimada, mas observa-se um aumento do período da onda. O volume galgado (Figura 5.33) para $n=0.40$ mostra que, o galgamento só ocorre em três períodos, isto deve-se ao facto que a onda dissipa e transmite energia suficiente na estrutura. Com $n=0.3$, o galgamento é muito intenso nos primeiros períodos, mas depois diminui fortemente. Aqui verifica-se que nos primeiros impactos a energia da onda não consegue ser suficientemente dissipada nem transmitida ou refletida pela estrutura, de forma a galgar a água com muita intensidade. Sendo que depois deste dois períodos a intensidade do galgamento reduz até à ausência do galgamento. O ensaio com o melhor desempenho é com a porosidade $n=0.35$ para o núcleo. A Tabela 5.16 mostra os valores obtidos para cada manto pela calibração da porosidade.

Tabela 5.16. Valores obtidos para a porosidade depois da calibração

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
Manto principal	0.45	100	1.1	0.34	0.053
Manto secundário	0.4	100	2.0	0.34	0.030
Manto secundário int.	0.4	100	2.0	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1	0.34	0.013

5.5.3 Calibração do coeficiente de resistência não linear, β

Calibrada a porosidade, calibra-se então o coeficiente de resistência não linear β . A calibração da porosidade tem um efeito muito forte sobre o escoamento (Patricio, 2012). O β têm menos influência sobre escoamento que a porosidade e permite um ajuste mais fino aos dados experimentais. A calibração do β para os mantos é feita com a porosidade anteriormente determinada. Tenta-se entender a influência do β sobre o comportamento da onda e qual o efeito sobre o galgamento.

5.5.3.1 Manto principal

Os valores testados para β do manto principal são inspirados no gráfico de Van Gent (Figura 2.13). Com os novos parâmetros de onda entende-se que o β terá de diminuir, mas para entender os efeitos do β resolveu-se escolher um valor maior e um menor que na simulação anterior. Na Tabela 5.17 estão os valores usados nos ensaios e as Figuras 5.34 e 5.35 apresentam a elevação da superfície livre para cada sonda e a Figura 5.36 o volume galgado por metro por largura do quebra-mar.

Tabela 5.17. Valores dos parâmetros da calibração de β do manto principal

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.45	100	0.9	1.1	1.3	0.34	0.053
MS	0.4	100	2.0			0.34	0.030
MSi	0.4	100	2.0			0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1			0.34	0.013

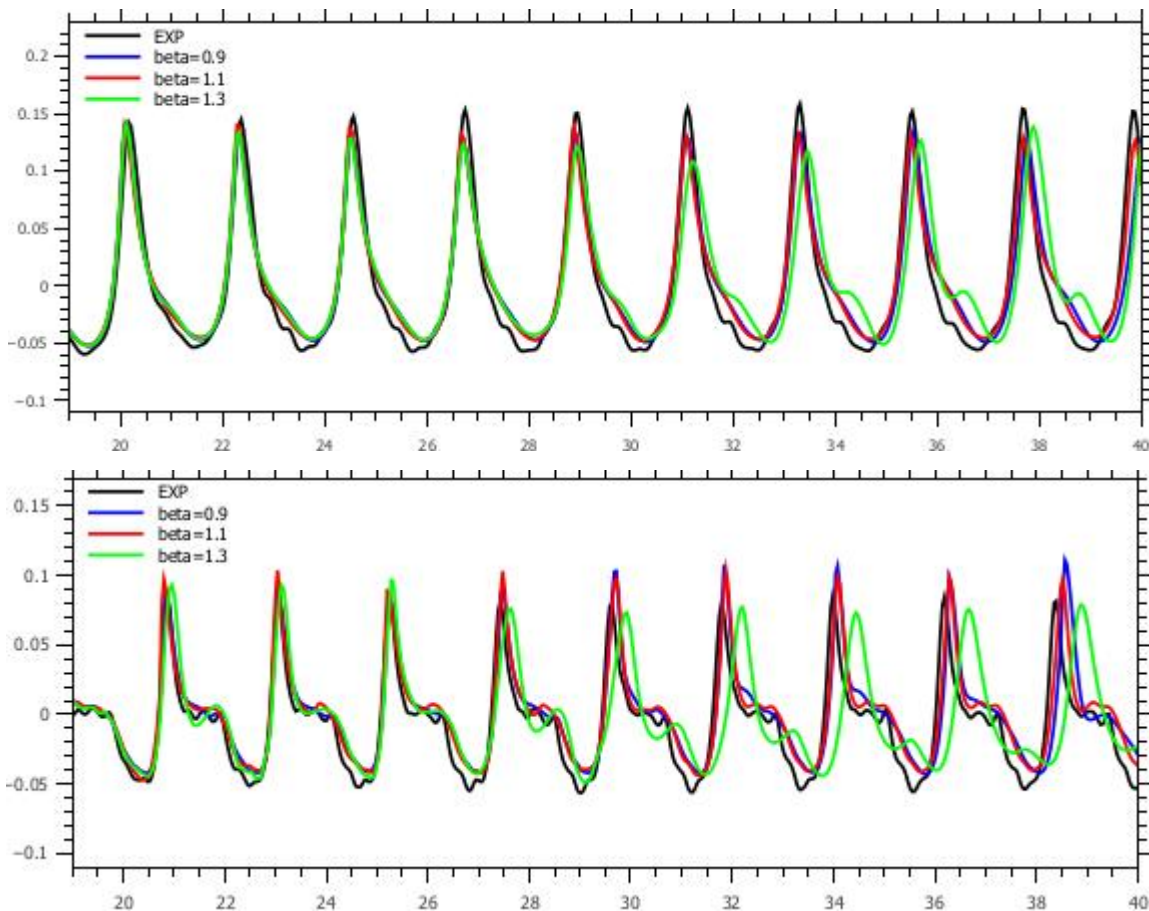


Figura 5.34. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, sonda 6 e 7 (de cima a baixo, respetivamente)

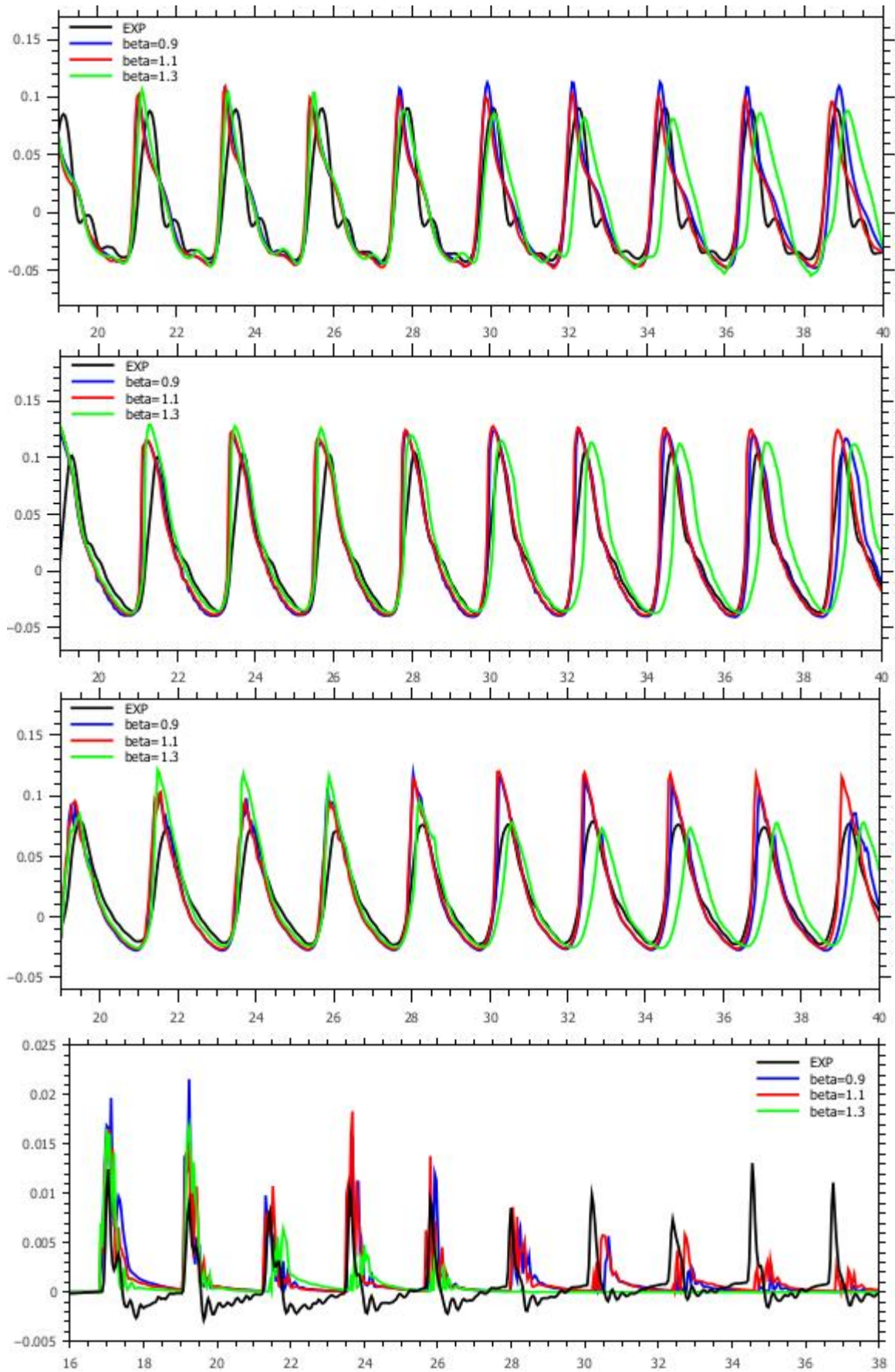


Figura 5.35. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 8 a 11 (de cima a baixo, respetivamente).

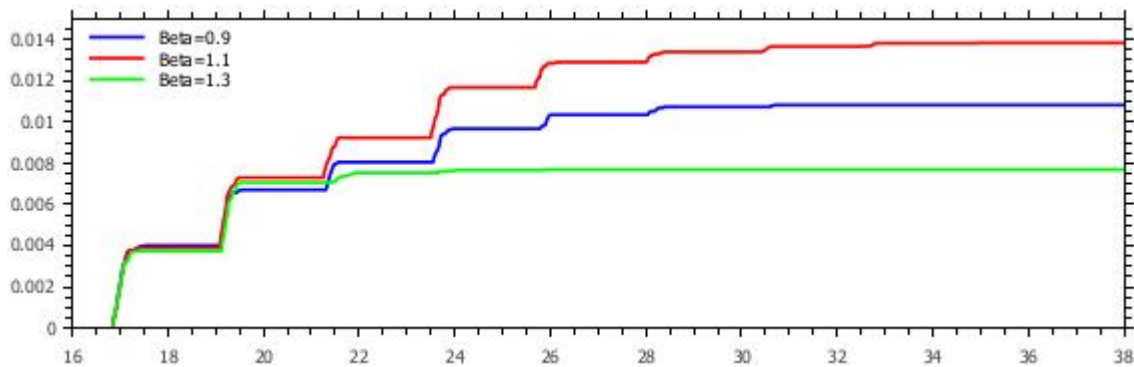


Figura 5.36. Comparação do volume galgado por metro com diferentes β

A barlamar do quebra-mar, nas sondas 6 e 7, verifica-se que o aumento da resistência provoca um afastamento dos dados experimentais, tanto na amplitude como no período. Com $\beta = 1.3$ a resistência no manto principal não permite a elevação da onda dentro do manto, dissipando mais energia. Com $\beta=0.9$ e $\beta = 1.1$ a onda é bem descrita nesta parte do domínio, tendo uma ligeira sobrelevação. Também o espraçamento captado pela sonda 9, é satisfatório, mas é visível uma diferença do período entre ambos. Observa-se que no ensaio com β inicia-se o desfasamento mais cedo (em $t=38s$), este instante coincide com o fim do galgamento do ensaio. Como a transmissão da onda diminui, devido a falta de galgamento, mais energia têm que ser refletida e dissipada, logo altera-se o comportamento da onda. Confirma-se que $\beta=1.1$ permite uma boa aproximação aos dados. A altura da onda no núcleo continua a ser visível, sendo que o ensaio com maior resistência simula a altura de onda muito próxima da real. O volume galgado para $\beta=0.9$ e $\beta=1.1$ nos primeiros instantes, é idêntico. A amplitude do galgamento é sobrestimado nos primeiros dois instantes, atenuando e mostrando uma boa paridade de $t=21s$ a $t=29s$. Analisando todos os ensaios, conclui-se que a maior convergência com os dados experimentais são com $\beta = 1.1$.

5.5.3.2 Manto Secundário

Segue-se a calibração do manto secundário, no qual se recorreu novamente ao gráfico de Van Gent (Figura 2.13). Entendeu-se que o β irá diminuir devido ao aumento da velocidade em relação aos ensaios sem galgamento. Mesmo assim resolveu-se testar $\beta=1.8$, $\beta=2.0$ e $\beta=2.2$, o que representa um aumento de resistência e uma diminuição da resistência em relação à altura ao valor inicial. A Tabela 5.18 mostra os valores usados nos ensaios e as Figuras 5.37 e 5.38 mostram a elevação da onda ao longo do tempo, em cada uma das sondas. O volume galgado por metro em função do tempo das simulações está representado na Figura 5.39.

Tabela 5.18. Valores dos parâmetros da calibração de β do manto secundário

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.45	100	1.1			0.34	0.053
MS	0.4	100	1.8	2.0	2.2	0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.8	2.0	2.2	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1			0.34	0.013

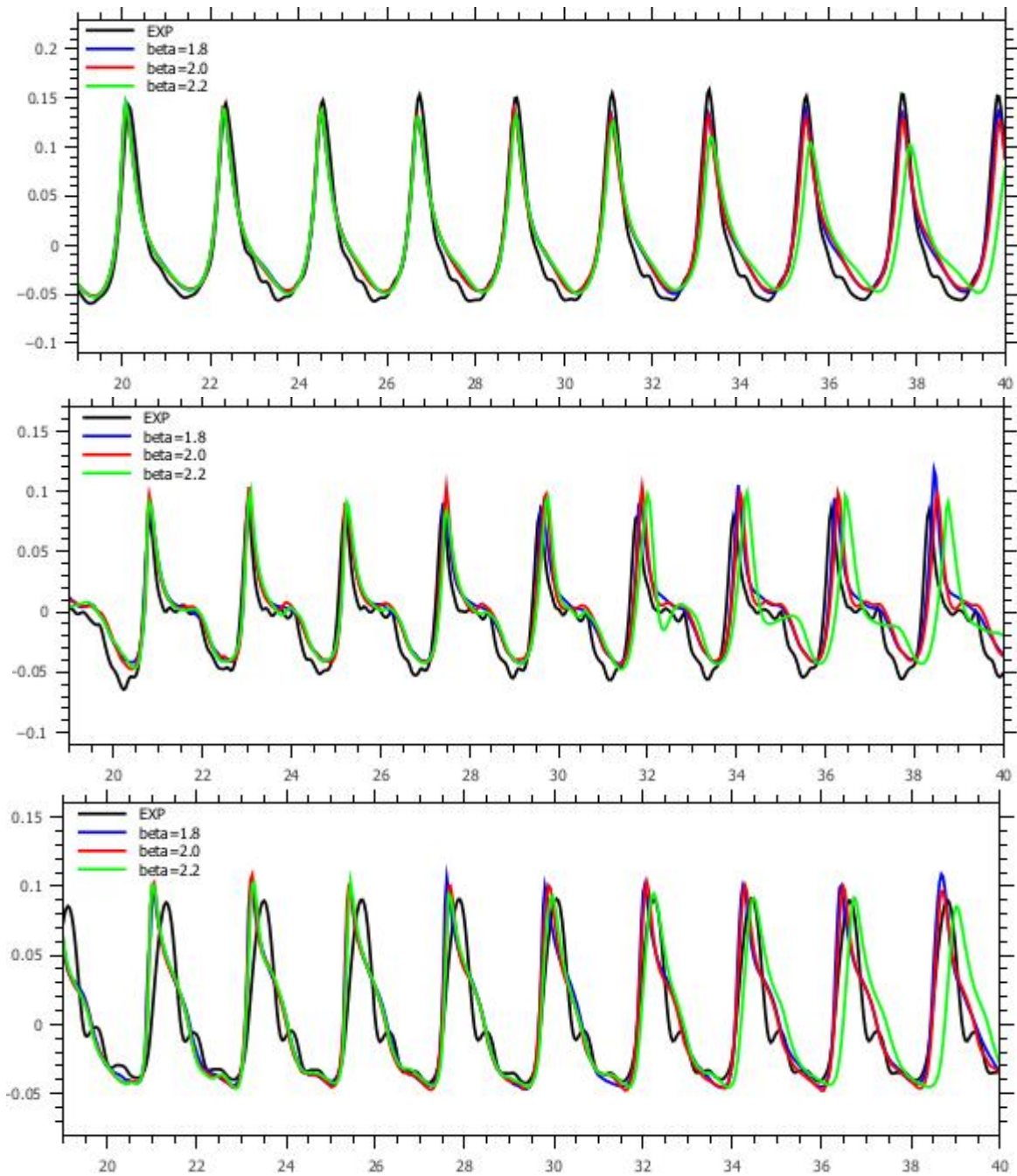


Figura 5.37. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente).

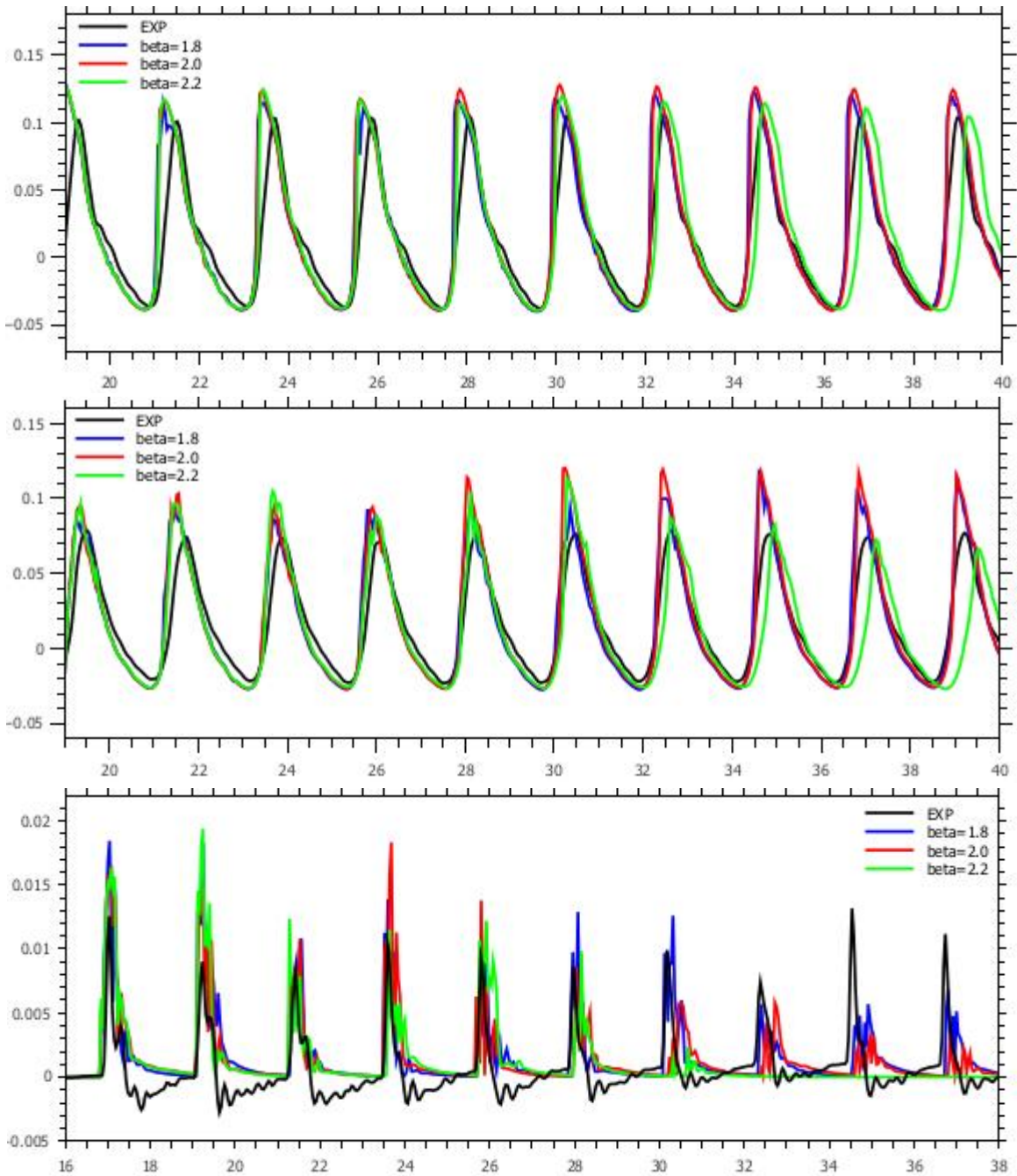


Figura 5.38. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 9 a 11 (de cima a baixo, respetivamente).

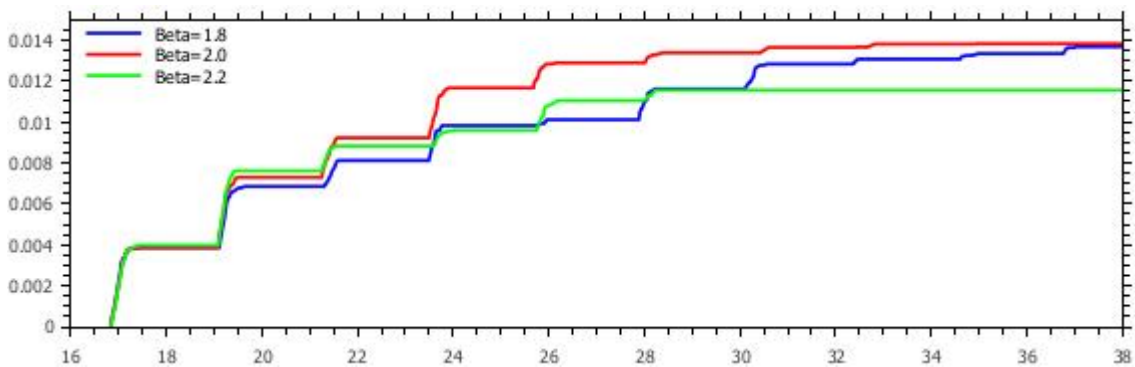


Figura 5.39. Comparação do volume galgado por metro com diferentes β

Na globalidade dos resultados, verifica-se o que se suspeitava: O aumento da resistência afasta os resultados numéricos dos dados experimentais. Os primeiros períodos são bem representados nos três valores testados, observa-se aqui uma menor sensibilidade do comportamento da onda em relação à calibração do manto principal. Na sonda 6 com $\beta=2.2$ em $t= 30$ s, a onda refletida diminui a amplitude da onda incidente. A reflexão torna-se muito forte e a onda já não é galgada (Sonda 11). Neste instante, a sonda 10 mostra uma diminuição da transmissão da energia pelo quebra-mar. A diminuição da resistência do manto secundário ($\beta=1.8$) mostra um bom comportamento, muito idêntico ao ensaio anterior, com $\beta=2.0$. Nas sondas fora e dentro do quebra-mar o perfil da onda é pouco influenciado pela diminuição da resistência, mas no galgamento o efeito é considerável. O galgamento volta a ser muito intenso nas primeiras duas ondas em todos os ensaios. Com $\beta = 2.0$ o galgamento é intenso durante os primeiro 5 períodos. Sendo que com $\beta = 1.8$ apenas é sobrestimada nos primeiros 2 períodos. Considerando o galgamento um fator importante para a aproximação ao comportamento da simulação, escolheu-se $\beta=1.8$ na camada secundária.

5.5.3.3 Núcleo

Depois da calibração dos parâmetros do β para os dois mantos exteriores, calibra-se agora o núcleo. Tomando em conta os resultados anteriores, entende-se que é necessário diminuir a resistência para tornar o núcleo mais permeável. Mesmo assim, testa-se um valor acima e um abaixo do β inicial ($\beta =1.1$) para entender-se os efeitos. Escolheu-se os valores 0.9, 1.1 e 1.3, para os ensaios da calibração de β do núcleo. Na Tabela 5.19 apresentam-se os valores usados para o meio poroso, as Figuras 5.40 e 5.41 representam a elevação da superfície simuladas e a Figura 5.42 mostra o volume galgado por metro de largura do quebra-mar em função ao tempo.

Tabela 5.19 Valores dos parâmetros da calibração de β do núcleo

	n	α	β			γ	D_{50} [m]
MP	0.45	100	1.1			0.34	0.053
MS	0.4	100	1.8			0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.8			0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	0.9	1.1	1.3	0.34	0.013

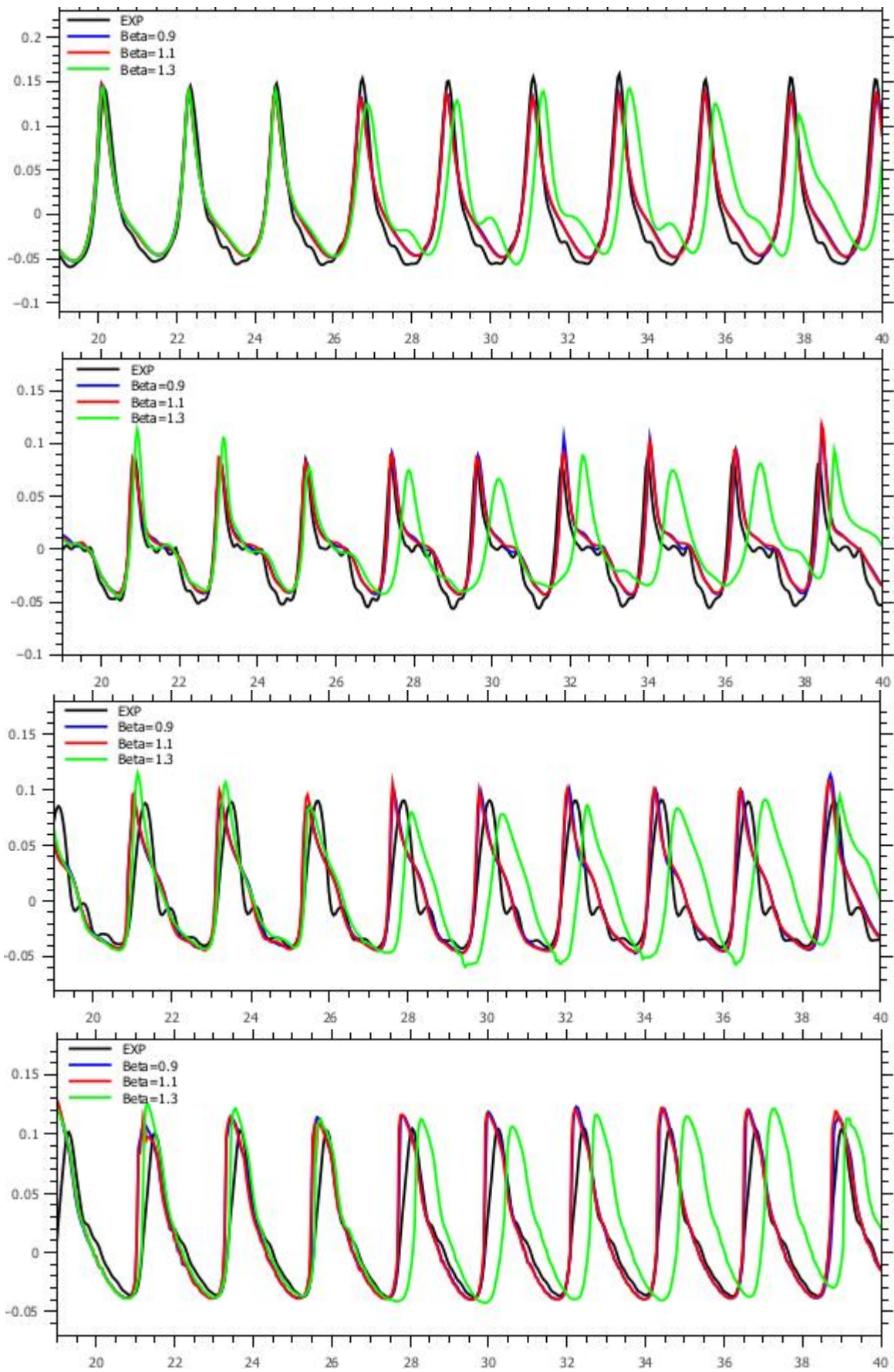


Figura 5.40. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 6 a 9 (de cima a baixo, respetivamente).

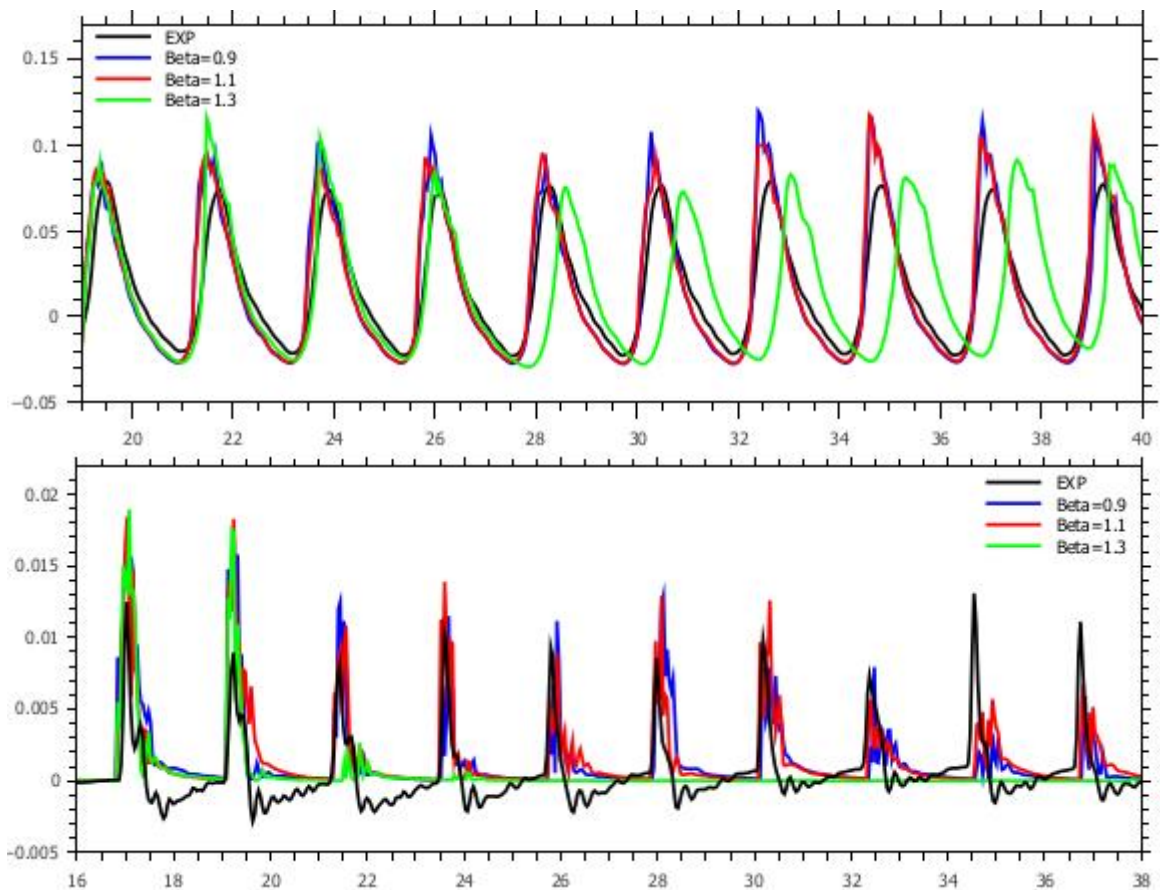


Figura 5.41. Comparação entre os diferentes β e dados experimentais, Sonda 10 e 11 (de cima a baixo, respetivamente).

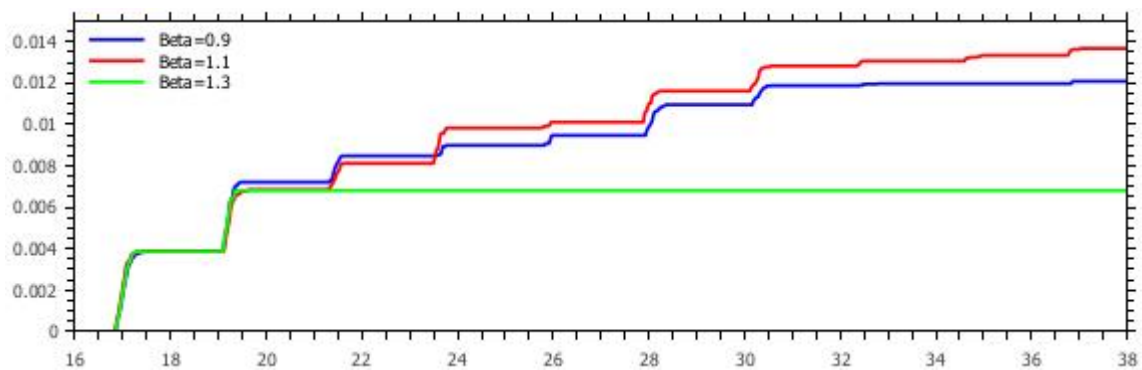


Figura 5.42. Comparação do volume galgado por metro com diferentes β

Os resultados da calibração do núcleo demonstram que o aumento da resistência ($\beta=1.3$) afasta os resultados numéricos dos dados experimentais em todas as sondas. Observa-se uma reflexão excessiva e uma certa dissipação da onda no quebra-mar. Nas sondas 6 a 9 é visível que a partir do instante $t=28s$ grande parte da energia da onda é refletida e dissipada na superfície do quebra-mar, o que leva à diminuição da energia transmitida para o interior do núcleo e reduz a massa de água galgada. Observa-se claramente na sonda 10 que, em $t=26s$ uma menor energia é

transmitida para o núcleo e o aumento da reflexão faz-se sentir em $t=28s$ nas sondas a montante do quebra-mar. Na sonda 11 entende-se que o aumento da reflexão coincide com o instante no qual a massa da água é galgada. Em relação aos ensaios com $\beta = 0.9$ e $\beta = 1.1$, os resultados são muito idênticos nas sondas antes e dentro do quebra-mar e, geralmente reproduzem ambos os ensaios um perfil de onda satisfatório. Com $\beta = 0.9$ a altura da água galgada (sonda 11) é bem aproximada entre $t=21s$ a $t=34s$. Depois deste intervalo, o galgamento diminui e as ondas incidentes somam-se à onda refletida, alterando a amplitude e o período da onda. Os primeiros dois galgamentos têm sido observados como muito intensos e continuam a ser simulados desta forma. O mesmo se pode afirmar em relação ao ensaio com $\beta = 1.1$, mas entende-se que $\beta = 1.1$ é a melhor solução, analisando a sonda 10, visto que a sobre-elevação é menor e aproxima-se mais ao perfil real da onda. Na Tabela 5.20 mostra-se os parâmetros determinados com a calibração sequencial.

Tabela 5.20. Valores obtidos para os parâmetros do meio poroso depois da calibração

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.45	100	1.1	0.34	0.053
MS	0.4	100	1.8	0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.8	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1	0.34	0.013

5.5.4 Discussão de resultados da calibração

Analizando todos os resultados, verifica-se que a elevação da onda é bem representada fora e dentro do quebra-mar e que a calibração dos parâmetros do meio poroso permitiu aproximar os resultados das simulações aos resultados experimentais. Nos ensaios com uma altura de onda de $H=0.083$ m, os efeitos dos parâmetros do meio poroso eram visíveis, mas não com a mesma intensidade. Isto deve-se ao aumento da amplitude da onda e à consequente ocorrência do galgamento. A energia ao ser transferida sobre o quebra-mar, reduz a energia disponível para a reflexão e vice-versa. A onda refletida é muito importante para o volume galgado, tendo uma ação muito forte sobre a onda incidente e é extremamente dependente do meio poroso. A porosidade mostrou-se ser o parâmetro mais influente sobre a energia da onda incidente, sendo o manto exterior o mais influente. Como a porosidade tem a maior ação sobre a interação de onda com a estrutura permite a calibração deste parâmetro uma rápida convergência aos dados experimentais e a calibração do coeficiente β é um ajuste mais fino.

A altura de água galgada mostrou-se muito sensível ao meio poroso, já que depende muito dos acontecimentos hidrodinâmicos a montante e dentro do quebra-mar. Na maior parte dos ensaios observou-se o que aumento da porosidade diminui o galgamento, mas na Figura 5.27 o galgamento aumenta. O que pode ser causado pela forma como a onda é refletida, dependendo do período da onda refletida em relação a onda incidente. Foi possível calibrar o meio poroso de forma a gerar um galgamento satisfatório. Contudo o galgamento e a altura da lamina de água galgada não são reproduzidos com o mesmo rigor que a elevação da superfície livre. As discrepâncias são causadas pelo método de captura da fração de volume que introduz erros de aproximação e pelo refinamento da malha. Tem de se referir ainda que os resultados demonstram que o código tem dificuldade em anular as ondas refletidas pela estrutura que incidem no batedor. Em instantes depois de $t=40s$, não apresentadas nesta dissertação, verifica-se a tendência das ondas geradas alterarem o seu período e diminuírem a altura da onda.

A captura do volume galgado foi efetuada, como descrito na secção 3.3.1 e permitiu uma boa aproximação, sobrestimando sempre os primeiros dois galgamentos. Os primeiros dois impactos da onda são muito intensos, porque as ondas refletidas ainda não interagem com as ondas incidentes. No caso experimental este galgamento excessivo não se verifica, pois no batedor físico a onda é gerada de forma progressiva, aumentando a amplitude lentamente até atingir a altura de onda desejada. No caso numérico, o batedor é estático e aplica-se um campo de velocidades à fração de água, sendo que a primeira e segunda onda gerada incidem sobre a estrutura com muito pouca reflexão. No entanto excluindo estes dois primeiros galgamentos, o volume galgado é bem estimado .

5.5.5 Comparação do melhor ensaio com os dados experimentais.

Neste subcapítulo apresenta-se a melhor simulação para a altura de onda com galgamento ($H=0.11m$), comparando os resultados com os dados experimentais. A Tabela 5.20 mostra os parâmetros determinados pela calibração e as Figuras 5.43 e 5.44 apresentam a elevação da superfície livre em função do tempo, tal como a altura da água galgada. A Figura 5.45 retirada do trabalho de Didier et al. (2014) é usada para o efeito de comparação do volume galgado simulado e representado na Figura 5.46. A Tabela 5.22 mostra os resultados da análise estatística.

Tabela 5.21. Valores obtidos para os parâmetros do meio poroso pela calibração

	n	α	β	γ	D_{50} [m]
MP	0.45	100	1.1	0.34	0.053
MS	0.4	100	1.8	0.34	0.030
MSi	0.4	100	1.8	0.34	0.022
Núcleo	0.35	100	1.1	0.34	0.013

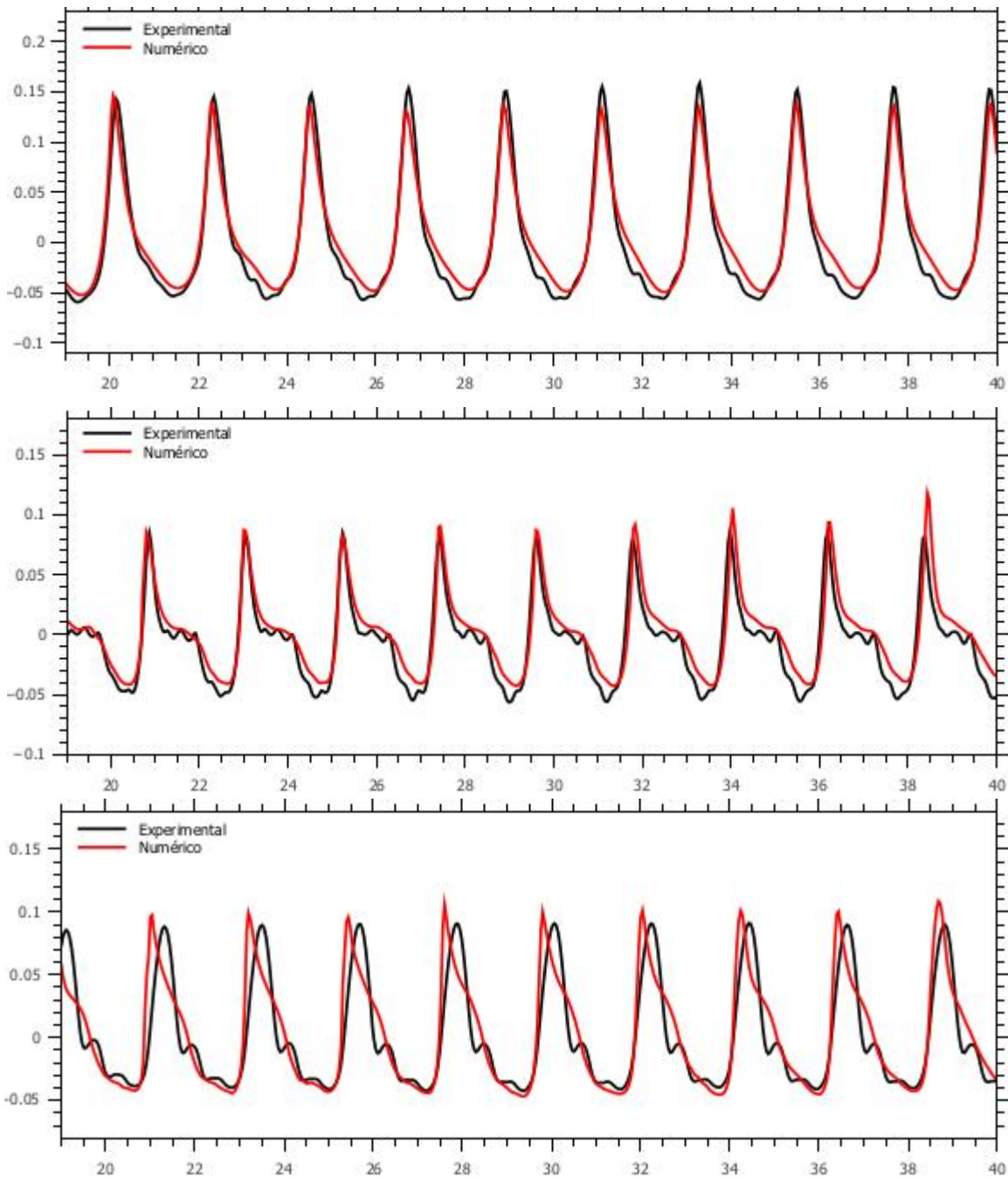


Figura 5.43. Comparação os resultados numéricos com os dados experimentais, Sonda 6 a 8 (de cima a baixo, respetivamente)

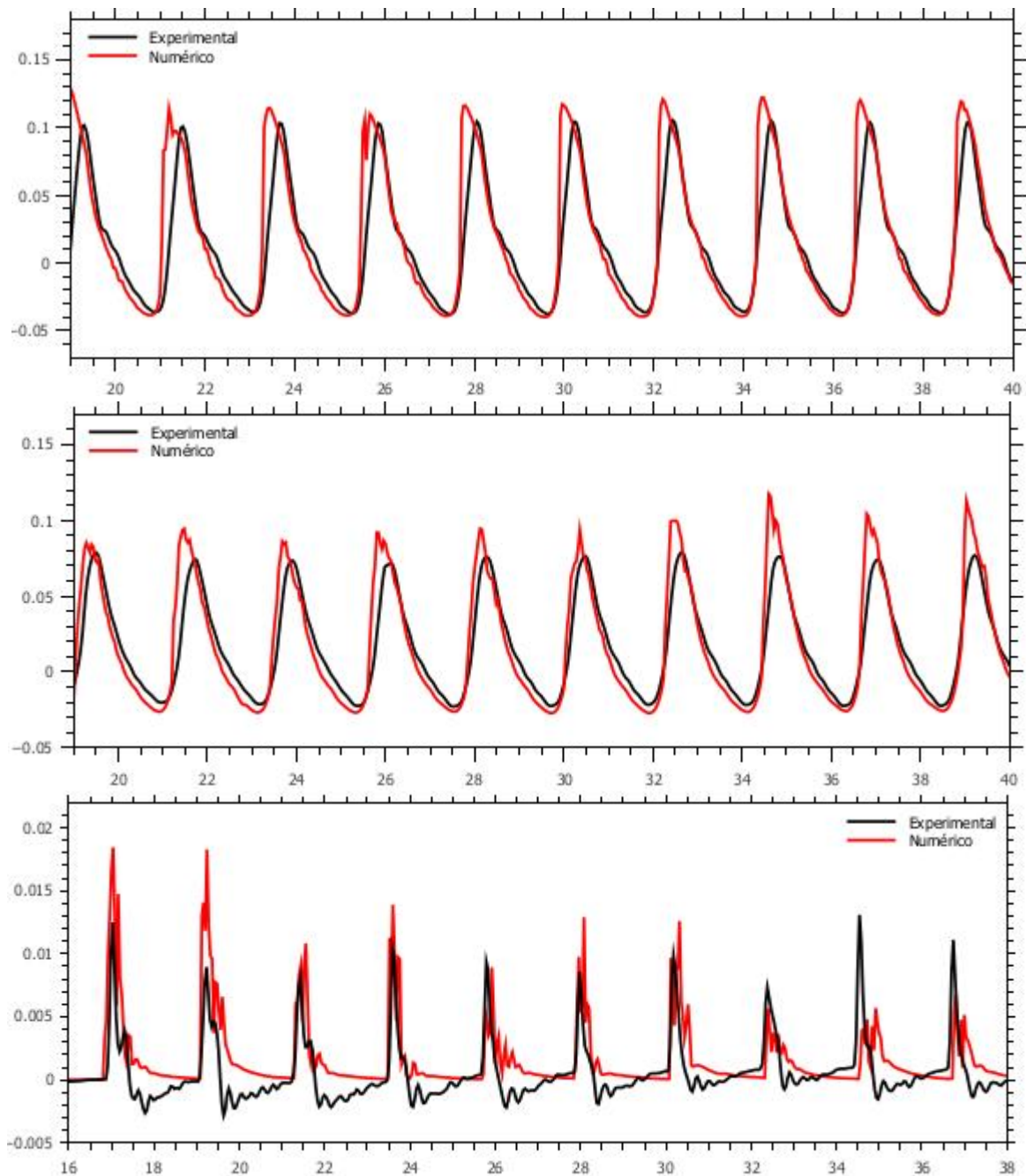


Figura 5.44. Comparação os resultados numéricos com os dados experimentais, Sonda 9 a 11 (de cima a baixo, respetivamente).

Na globalidade, pode-se afirmar que o movimento da superfície livre é muito bem representada, tanto a barlarar como dentro do quebra-mar, como já referido. A elevação da superfície livre na sonda 6 (Figura 5.43) é um pouco subestimada. Na sonda 7 o perfil da onda é bem representado, não conseguindo captar todas as oscilações de maior frequência causadas pelas ondas refletidas, mas mesmo assim atinge um IC de 0.972 (Tabela 5.22), o que mostra o bom desempenho do código. A sonda 8 mostra uma boa correlação com os resultados experimentais,

no entanto as oscilações de maior frequência não são bem reproduzidas. Nesta zona do domínio as velocidades são elevadas devido ao espraiamento e ao refluxo, o que aumenta os erros numéricos e influencia o escoamento. Contudo a altura de onda é bem estimada com o perfil de onda satisfatório, tendo um IC de 0.953. Na sonda localizada no interior do quebra-mar (sonda 9) verifica-se um perfil muito próximo do caso experimental com uma ligeira sobrelevação do resultado numérico. No interior do quebra-mar, na sonda 10, a altura da onda volta a ser sobreestimada o que pode ser causado pela formulação do meio poroso. Nesta zona existem alguns vórtices e o ar mistura-se com o movimento da onda e com a água, que é projetada no espraiamento para o coroamento e volta a entrar *por cima* (pela berma) para o interior do quebra-mar. Isto aumenta a discrepância nos resultados já que o ar só consegue escapar para o topo, o que em realidade não é o caso.

Tabela 5.22. Resultados da análise estatística para uma altura de onda de $H=3.3\text{m}$

	Sonda 6	Sonda 7	Sonda 8	Sonda 9	Sonda 10	Média
Bias	0.0039	0.0079	0.0026	0.0045	0.0007	0.0039
RMS	0.0144	0.0112	0.0183	0.0182	0.0117	0.0148
IC	0.984	0.972	0.953	0.968	0.979	0.971

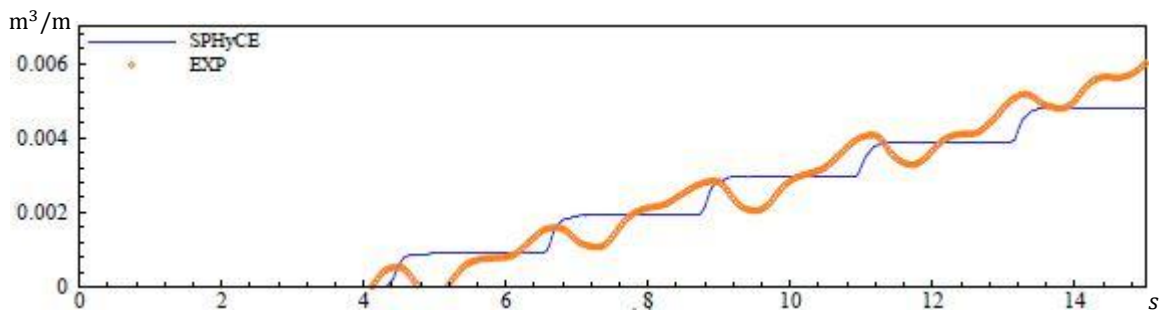


Figura 5.45. Volume por metro galgado Didier et al. (2014)

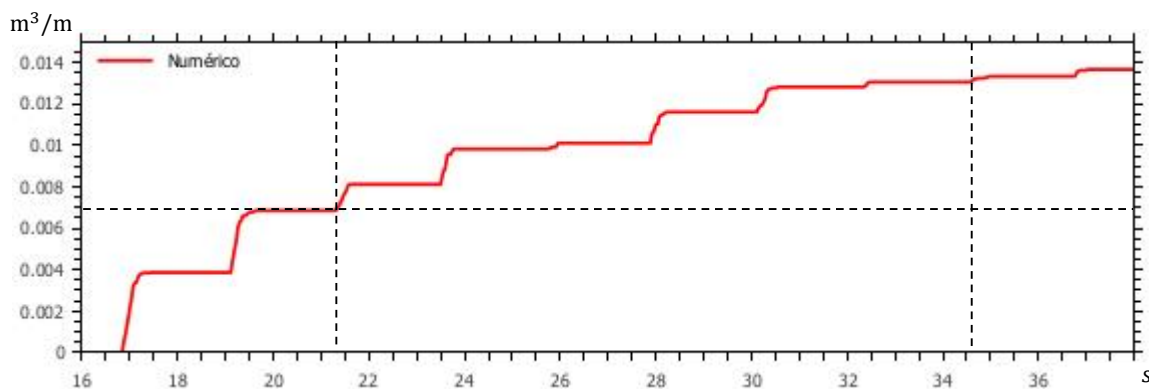


Figura 5.46. Volume por metro galgado, simulação numérica

Em relação à altura da lamina de água galgada, observa-se na Figura 5.44, na sonda 11 uma aproximação aceitável. As primeiras duas ondas incidentes geram um galgamento excessivo, porque as ondas refletidas ainda não interagem com as ondas incidentes, não atenuando as suas amplitudes (Figura 5.47). Entre os instantes $t=21s$ e $t=33s$, o que representa 6 períodos, observa-se uma altura da lamina de água galgada muito próxima. As diferenças entre os resultados experimentais e os dados numéricos da altura da onda galgada, podem ser relacionados com o método de captura da superfície livre do código *OpenFOAM* (Higuera, 2015b). A elevada velocidade do fenómeno do galgamento pode gerar erros numéricos. Este facto implica a importância de um passo de tempo variável consoante o número de Courant, para obter bons resultados e diminuir o tempo de cálculo. É importante referir também que a água projetada sobre o quebra-mar tem uma velocidade elevada e que no caso experimental a medição é muito difícil e que podem existir imprecisões associados ao ensaio físico.

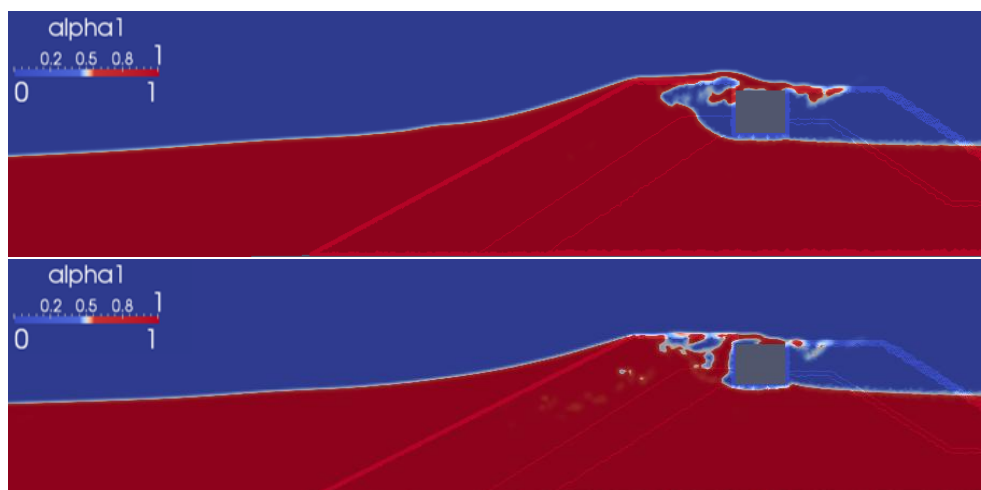


Figura 5.47. Primeira onda incidente (cima) com galgamento excessivo e terceira onda incidente (baixo) com um galgamento mais atenuado.

O volume galgado mostra algumas discrepâncias, onde os primeiros dois galgamentos são excessivos, à semelhança da altura da água galgada. O volume galgado entre $t=21s$ e $t=31s$ (Figura 5.46) é muito próximo dos resultados obtidos por Didier et al. (2014) e do caso experimental (Figura 5.4). Em termos médios, o volume galgado por metro obtido na simulação no intervalo de tempo referido é de aproximadamente $0.001195 m^3/m$ e no caso experimental é de $0.00110 m^3/m$ (dado obtido graficamente). Determinou-se também o caudal médio por metro de largura do quebra-mar nesse intervalo de tempo com base no declive dos gráficos (Figura 5.45 e Figura 5.46). O caudal médio por metro de largura do quebra-mar simulado é de $5.4 (l/s)/m$, já

que o caudal por metro médio experimental é de 5.75 (l/s)/m (valor obtido recorrendo ao gráfico). Esta aproximação é satisfatória, visto a complexidade do evento do galgamento. Existe em $t=26s$ um galgamento de pouca intensidade, o que se observa na Figura 5.46. Na sonda 11 (Figura 5.44), observa-se que todas as sondas mostram umas oscilações de maior frequência neste instante. Isto pode ser causado por ondas refletidas que alteram o comportamento da onda, e neste caso diminuindo o galgamento. Mas globalmente, é possível afirmar que o movimento da superfície livre com um IC médio de 0.971 (Tabela 5.22) e o galgamento foram estimados de forma satisfatória, tendo o volume galgado e a altura de onda galgada a menor qualidade de aproximação aos dados experimentais.

6 Conclusões e trabalhos futuros

Esta dissertação focou-se no estudo e na validação do código numérico *OpenFOAM* com o *solver IHFOAM* para a interação de ondas com estruturas marítimas porosas. Neste sentido, estudou-se o quebra-mar poente do porto de pesca de Albufeira. Como o *OpenFOAM* é um *Software* gratuito e um código aberto, podendo ser livremente manipulado, torna-se muito apelativo para a área da hidrodinâmica costeira validar esta ferramenta de CFD para problemas com escoamento oscilatório em meios porosos. Estes problemas são de extrema complexidade e normalmente estudados com experiências físicas. As validações dos códigos numéricos permitem ter confiança nos resultados e melhorar os códigos, tornando-os importantes para estudos e projetos com fenómenos hidrodinâmicos.

Numa primeira fase do trabalho estudou-se a dependência da superfície livre simulada face ao tipo e ao refinamento da malha. Este estudo é importante devido ao tempo dispensado na criação de malhas com elementos rectangulares e estruturadas ou mesmo à impossibilidade de gerar este tipo de malha para geometrias complexas. É necessário encontrar um compromisso entre o tempo dispensado na construção da malha, o tempo de cálculo e a qualidade dos resultados obtidos. Adicionalmente estudou-se a dependência da simulação do modelo de turbulência, recorrendo ao modelo de turbulência $k - \epsilon$. Numa segunda fase estudaram-se os efeitos da variação dos parâmetros do meio poroso do quebra-mar, realizando uma calibração destes parâmetros. Este estudo foi feito com duas alturas de ondas, uma altura de onda ($H=0.083m$) que não gera galgamento e uma altura de onda ($H=0.11m$) com galgamento. Foram colocadas duas sondas antes do quebra-mar e três no seu interior para medir a elevação da superfície livre. Foi ainda colocada uma sonda no coroamento para medir o galgamento.

Os resultados obtidos da simulação da dependência da malha mostram que a malha *mista* (com elementos triangulares no meio poroso e retangulares fora do meio poroso) gera valores muito próximos de uma malha com elementos rectangulares em todo o domínio. Mostrou-se assim que não é necessário a criação de uma malha com elementos rectangulares no meio poroso. Foram feitos vários estudos que não estão descritos neste trabalho que mostraram que a malha com elementos rectangulares é muito importante para a zona exterior ao meio poroso. A falta de ortogonalidade da malha cria movimentos artificiais na superfície livre, fora da zona porosa. Contudo, conclui-se que é aceitável modelar o meio poroso com uma malha com elementos triangulares e não estruturada e com elementos rectangulares fora do meio poroso. Mas é importante referir que nesta zona do domínio, observou-se a maior dificuldade do código em descrever o movimento da superfície livre e a maior discrepância entre os dados experimentais e os dados numéricos. Isto deve-se as variações de tamanho dos elementos na interface entre as duas malhas que introduzem erros de aproximação. O estudo da dependência do modelo de turbulência mostra que sem modelação da turbulência, o código tende a sobrestimar a elevação da onda, sobretudo na zona do pé do quebra-mar e na superfície do manto principal. Nesta zona as acelerações do escoamento são elevadas, tendo fortes gradientes de velocidade devido às ondas refletidas e ao efeito do espraiamento e do refluxo. No interior do quebra-mar também se verificou a sobre-elevação da onda sem modelo de turbulência em relação aos dados experimentais, isto deve-se à existência de vórtices no meio poroso que aumentam a resistência ao escoamento e que devem ser modelados. Conclui-se que para a simulação deste tipo de problemas deve-se usar um modelo de turbulência.

Os resultados da calibração dos parâmetros do meio poroso mostraram a necessidade de ajuste de cada parâmetro (porosidade e coeficientes de resistência) para obter resultados satisfatórios e que o método de calibração dos parâmetros do meio poroso obteve uma boa convergência com os resultados experimentais. As simulações demonstraram a influência de cada parâmetro sobre o escoamento, destacando que a porosidade é o parâmetro mais influente e que o manto exterior do quebra-mar tem a maior ação sobre o escoamento externo e interno da estrutura. Isto deve-se ao facto de que o manto exterior é o mais solicitado durante a interação onda-estrutura, sendo que este reflete e dissipa a maior quantidade de energia. Para a altura de onda sem galgamento ($H=0.083\text{m}$), a calibração dos parâmetros atingiu um índice de concordância médio de 0.982 (Anexo 2), com um perfil da superfície livre no interior do quebra-mar com IC de 0.99 com os resultados experimentais (Anexo 2). Na calibração dos parâmetros com galgamento com uma altura de onda de $H=0.11\text{m}$, tornou-se evidente o efeito da porosidade e do coeficiente de resistência β sobre o volume galgado e sobre os fenómenos hidrodinâmicos a montante e dentro do quebra-mar. A resposta da estrutura depende muito do meio poroso e dos seus parâmetros,

tendo uma maior ou menor reflexão, dissipação e transmissão dependendo da resistência e da porosidade. Ao fim da calibração, os dados experimentais e os numéricos obtiveram uma boa correlação, tanto fora como dentro do quebra-mar atingindo um IC médio de 0.971 (Tabela 5.22). A pior concordância foi na sonda 8 com um IC de 0.953, que continua a ser uma boa aproximação. Na sonda 11 localizada no coroamento, a altura do galgamento foi satisfatoriamente simulado. As primeiras duas ondas incidentes geraram um galgamento excessivo comparado com os dados experimentais, isto pode ser causado pela diferença na geração da onda numérica e experimental e pela medição deste evento que ocorre a alta velocidade, tanto no caso numérico como experimental. A calibração mostra ainda que o galgamento é fortemente dependente da intensidade da onda refletida e dissipada. Ambos são dependentes dos parâmetros do meio poroso e assegura-se assim que o galgamento tem uma relação próxima com a porosidade e o coeficiente de resistência β . No volume galgado também se confirma a maior discrepância nos primeiros dois períodos de onda que chegam à estrutura. Excluindo os primeiros dois períodos, o volume galgado numericamente é muito próximo do experimental. A média do volume galgado numericamente nos 5 períodos, depois dos 2 iniciais, é de $0.001195 \text{ m}^3/\text{m}$ e o experimental é de $0.00110 \text{ m}^3/\text{m}$, o que representa uma boa aproximação. O caudal por metro médio nos 5 períodos referidos também foi bem estimado. O caudal por metro médio da simulação é de 5.4 (l/s)/m e o experimental é de 5.75 (l/m)/s .

De uma forma geral afirma-se que o método de calibração usado garante uma convergência dos resultados numéricos aos dados experimentais. A boa correspondência entre os dados experimentais e os dados obtidos pelas simulações permite reproduzir os efeitos hidrodinâmicos da estrutura sobre o escoamento, tanto a barlar como no interior da estrutura com o código *OpenFOAM*. O galgamento também foi representado satisfatoriamente, tendo em conta a complexidade do acontecimento.

Na perspectiva de trabalho futuro, seria interessante dar continuidade ao trabalho desta dissertação. Era muito interessante quantificar a energia da onda refletida, transmitida e dissipada neste quebra-mar, recorrendo ao IHFOAM e aos parâmetros do meio poroso determinados. Isto possibilitava a comparação com as equações empíricas usadas no projeto deste tipo de estruturas e um estudo mais aprofundado sobre os efeitos hidrodinâmicos durante da interação onde-estrutura. Interessava também recorrer ao método para a calibração dos parâmetros do meio poroso usado para calibrar outra estrutura marítima com várias zonas porosas. Outra proposta era a realização de um estudo aprofundado sobre o método de captura da fração de água do *OpenFOAM*, para garantir que a captura é feita com rigor. O estudo foi realizado em duas dimensões, interessava de estudar este caso com três dimensões, de forma a comparar a validade

de um estudo bidimensional de problemas desta natureza. Ainda era de valor de estudar vários modelos de turbulências de forma a entender qual dos modelos tem o melhor desempenho neste tipo de problemas.

7 Bibliografia

Airy, G. B. (1841). Tides and waves. Encyc. Metrop., Article 192 241-396.

Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. ASCE; Proceedings International Conference Coastal Engineering (ICCE). Vol. 14, No. 1, pp. 466–477. New York.

Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. American. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York

Biesel, F. (1950). Equations de l'écoulement non lent en milieu perméable. Houille Blanche; No. 2, pp. 157.

Brennen, C.E.(1982). A review of added mass and Fluid inertial forces. Naval Civil Engineering Laboratory. Port Hueneme, California

Burcharth, H. F., & Christensen, C. (1991). On Stationary and Non-stationary Porous Flow in Coarse Granular Materials. European Community. MAST G6-S: Project 1, Wave Action on and in coastal structures. Aalborg:Aalborg Universitetsforlag.

Burcharth, H. & Andersen, O. (1995). On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations. Coastal Engineering, (No. 24). p. 233-257

Cavalo, L., Dentale, F., Giovanna, D., Foti, E., Musumeci, R.E. & Carratelli, E.P. (2012). Rubble mound breakwater Overtopping: Estimation of the Reliability of a 3d Numerical Simulation. Coastal Engineering Proceedings. No.33

CFD Online. Available: <http://www.cfd-online.com/> [Acedido em 2015].

Darcy H. (1856). Les Fontaines publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, Paris.

Demirbilek, Z & Vincent, C. L. (2002). Water Wave Mechanics. In: Vincent, L., and Demirbilek, Z. (editors), Coastal Engineering Manual, Part II, Hydrodynamics, Chapter II-01, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC

- Dybbs, A. & Edwards, R.V.(1984). A new look at Porous media Fluid Mechanics – Darcy to Turbulent. In *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Bear & Corapcioglu. Martinus Nijhoff Publishers, pp. 199-256.
- del Jesus, M., Lara, J.L. & Losada, I.J., (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous structures. Part I: Numerical model formulation. *Coastal. Engineering*. 64, 57–72.
- Dean, R.G & Dalrymple, R.A.(1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Publishing Co.
- 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.
- Didier, E., Neves, E., Teixeira, P., Dias, J. & Neves, M. G. (2014). SPH Numerical and Physical Modeling of Wave overtopping a Porous breakwater. 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, Porto, Portugal. ISBN 978-989-96479-2-3
- Engelund, F. (1953). On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. *Transactions of Danish Academy Technical Science*, Vol. 3., Denmark
- EuroTop (2007). *Die Küste*. Archiv für Forschung und Technik an der Nord-und Ostsee. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.
- Forchheimer, P. (1901). Wasserbewegung durch Boden. *Zeitschrift Verband Deutscher Ingenieure (VDI)*, No. 45.
- Geuzaine, C. & Remacle, J.-F. (2009). Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), pp. 1309-1331.
- Gonçalves, N.D.F. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Departamento de Matemática Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
- Gil, L.M.D.C (1999). *Interacções onda-onda num canal bidimensional*. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Ph.D. Thesis
- Hald, T. (1998). *Wave Induced Loading and Stability of Rubble Mound Breakwaters*. Aalborg: Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University.Ph.D. Thesis
- Higuera, P. C., Lara, J.L.& Losada, I.J., (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: application to OpenFOAM. *Coastal. Engineering*. 71,102–118.
- Higuera, P. C., Lara, J.L.& Losada, I.J., (2013a). Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM. *Coastal. Engineering*. 71,119–134.
- Higuera, P. C. (2015). *Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional a la Acción del Oleaje Sobre Estructuras*. Ph.D Thesis. Dpt de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Unversidade de Cantabria.

- Higuera, P. C. (2015a). <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/138987-ihfoam-thread-5.html#post525417> [acedido em 2015]
- Higuera, P. C. (2015b). <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/138987-ihfoam-thread-4.html#post518126> [acedido em 2015]
- Hirt, C.W. & Nichols, B.D. (1979). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of computational Physics* No 39, 201-225
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T. & Liu, T.P., (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal. Engineering*. 46 (1), 25–50.
- HYDRALAB III (2007). Guidelines for physical model testing of breakwaters: Rubble mound breakwaters. Deliverable NA3.1-2, HYDRALAB III Consortium Participants and EC.
- Iribarren, M.R. (1949). Protection des Ports. Proceedings XVIIth International Navigation Congress, Section II, Communication 4, Lisbon, pp. 31–80
- IHFOAM, IHCantabria. <http://ihfoam.ihcantabria.com> [Acedido em 2015]
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. & Fredsøe, J., (2012). A wave generation toolbox for the opensource CFD library: OpenFOAM®. *International. Journal. For Numerical. Methods Fluids* 70 (9), 1073–1088.
- Jacobsen, N.G. (2015a). <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/100091-waves2foam-related-topics-49.html#post546919> , [acedido em 2015]
- Jacobsen, N.G. (2015b). <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/100091-waves2foam-related-topics-51.html#post557436> , [acedido em 2015]
- Jasak, H. (1996). Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows; Ph.D Thesis. Dpt. of Mechanical Engineering, Imp. College of Science, London
- Jensen, B., Jacobsen, N.G. & Christensen, E. D. (2013). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures. *Coastal Engineering* No 84 56–72
- Lara, J.L., Ruju & A., Losada, I.J., (2011). Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proc.. Royal. Society. A* 467, 1215–1242.
- Lara, J. L., Losada, I. J. & Guanache, R. (2008). Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering* No. 35, 1388–1400.
- Lin, P. (1998). Numerical modeling of breaking waves. Ph.D thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Le Méhauté, B. (1958): Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques (suite). *Houille Blanche*; Vol. 2, pp. 148–179.
- Le Méhauté, B. (1976). *Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer-Verlag, New York
- Massel, S.R., (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction*. Advanced Series on Ocean Engineering: Vol. 36, World Scientific, Singapore.

- Medina, P. B. R. (2008). Study and Numerical Simulation of Sediment Transport in Free-Surface Flow. Department of Mechanical Engineering and Fluid Mechanics, Universidad de Málaga
- Mellink, B. (2012). Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater. Delft University of Technology, Faculty of civil engineering and geosciences. MsC Thesis
- Mestre, N.J.S.N. (2015). Estudo do galgamento do quebra-mar de talude do Porto de Albufeira. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa. Ms.C Thesis
- Muttray, M.O. (2000). Wellenbewegung an und in einem geschütteten Wellenbrecher. Technischen Universität Carolo–Wilhelmia zu Braunschweig
- Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. Transactions of the ASME. University of Princeton, New Jersey.
- Morgen, G.C.J.(2013). Application of the InterFoam VOF Code to coastal Wave/Structure Interaction. Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath. Ph.D Thesis
- OpenCFD Ltd. The OpenFOAM Foundation. The OpenFOAM Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/version2.2.2/>. [Acedido em 2015].
- OpenCFD Ltd. The Open Source CFD Toolbox – User Guide. The OpenFOAM Foundation. Available: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/UserGuide.pdf> [Acedido em 2015].
- OpenCFDa Ltd. The OpenFOAM Foundation, - Multi-dimensional Limiter for Explicit Solution, Mules. <http://www.openfoam.org/version2.3.0/multiphase.php> [Acedido em 2015].
- Oumeraci, H.; Partenscky, H.W. (1990). Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwater. ASCE. Proceedings International Conference Coastal Engineering (ICCE). Vol. 22,pp. 14.
- Palmer, G.N. & Christian, C.D. (1998). Design and construction of rubble mound breakwaters. IPENZ Transactions, Vol. 25, No. 1/CE
- ParaView. Kitware Inc. <http://www.paraview.org> .[Acedido em 2015]
- Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; Hemisphere Publishing Corporation, McGraw Hill
- Patricio, T. M. (2012). Modelação numérica do galgamento de quebra-mares de talude. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa. Ms.C Thesis
- Pipa, I. J. L. (2008). Melhoria das condições de abrigo na marina da Póvoa de Varzim. Estudos em modelo matemático.Universidade Técnica de Lisboa: Instituto Superior Técnico
- Polubarinova-Kochina, P. Ya. (1952). Theory of the Motion of Ground Water, Gostekhizdat, Moscow
- QtOctave. Open-Source License. <https://apps.ubuntu.com/cat/applications/precise/qt octave/> [acedido em 2015]
- QtiPlot. Vasilief, I. <http://www.qtiplot.com> [acedido em 2015]

- Rusche, H. (2002). Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions. Ph.D Thesis. Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, London
- Sollitt, C.K. & Cross, R.H., (1972). Wave transmission through permeable breakwaters. In: 13th International Conference on Coastal Engineering, Vancouver, B.C. ASCE, New York, pp. 1827-1846.
- Sorensen, R.M. (2006). Basic Coastal Engineering. Springer-Verlag, New York
- Swak4Foam Wiki. Contribution swak4Foam.
<https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam> [acedido em 2015]
- The ParaView Guide (2015): A Parallel Visualization Application by Utkarsh Ayachit. Published by Kitware Inc., Clifton Park, NY.
- Troch, P. (2000). Experimentele studie en numerieke modellering van gol_ nteractie met stortsteengolfbrekers. Dept. Civiele techniek, Ghent University, PhD thesis.
- Unofficial OpenFOAM Wiki, Available: https://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page [Acedido em 2015].
- Van Gent, M.R.A., (1992). Formulae to describe porous flow. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology.
- Van Gent, M.R.A., (1993). Stationary and Oscillatory Flow through Porous Media. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology.
- Van Gent, M.R.A. (1995), Wave interaction with permeable coastal structures. Ph.D.Thesis, Delft University of Technology. Delft University Press, Delft. ISBN 90-407-1182-8
- Versteeg, H. & Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Scientific & Technical.
- Viegas, M.D.L. (2014). Modelação física do galgamento do quebra-mar do porto de Albufeira. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa. Ms.C Thesis
- Webb, A. A. (2013). Stokes Drift and Meshless Wave Modeling. University of Colorado, Department of Applied Mathematics. Ph.D. Thesis
- Wiegel, R.L. & Johnson J.W.(1950) Elements of Wave Theory., Institute of Engineering Research, and Division of Mechanical Engineering, University of California Berkeley.
- Willmot, C.J. (1981). On the validation of Models.Department of Geography, University of Delaware. Physical Geography

Anexo 1

Neste Anexo, encontra-se um esquema em árvore, de pastas e ficheiros do caso de estudo da secção 5.4 e secção 5.5 do *OpenFOAM*.

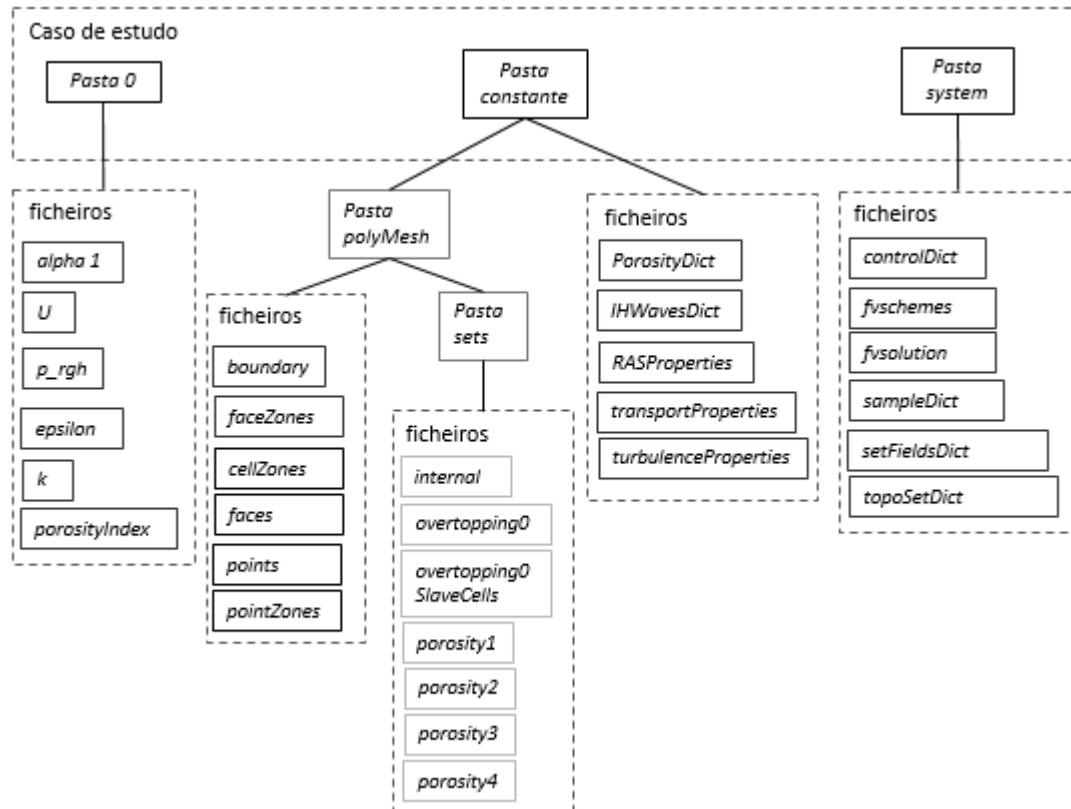


Figura A1.1. Esquema em árvore do caso *OpenFOAM*

Anexo 2

Análise estatística da calibração dos parâmetros do meio poroso

Neste anexo, encontra-se a análise estatística para a calibração dos parâmetros do meio poroso para cada sonda. As tabelas contêm os resultados para o RMS, Bias e para o IC de todos os ensaios secção 5.4.

Resultados da análise estatística da calibração da porosidade

De seguida, são apresentados os resultados da análise estatística para a calibração da porosidade. Cada tabela contém os resultados para todas as sondas e todas as porosidades de cada manto.

Tabela A 2.1. Análise estatística da calibração da porosidade do manto principal

Porosidade	Bias				RMS			
	0.3	0.35	0.4	0.45	0.3	0.35	0.4	0.45
Sonda 6	1.40E-03	1.40E-03	1.40E-03	2.00E-03	9.60E-03	9.30E-03	9.30E-03	1.07E-02
Sonda 7	2.00E-03	2.20E-03	1.90E-03	2.50E-03	1.01E-02	7.80E-03	7.00E-03	8.20E-03
Sonda 8	2.70E-03	2.70E-03	-1.90E-03	2.40E-03	1.61E-02	1.59E-02	1.34E-02	1.30E-02
Sonda 9	1.04E-02	7.00E-03	3.20E-03	-4.00E-04	2.47E-02	2.59E-02	2.22E-02	2.22E-02
Sonda 10	6.00E-03	6.10E-03	4.70E-03	3.90E-03	1.26E-02	1.54E-02	1.47E-02	1.47E-02
Porosidade	IC				Media das todas as sondas			
	0.3	0.35	0.4	0.45		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.989	0.989	0.989	0.984	0.3	3.40E-03	1.46E-02	0.961
Sonda 7	0.967	0.98	0.983	0.975	0.35	2.81E-03	1.49E-02	0.959
Sonda 8	0.956	0.955	0.968	0.968	0.4	1.86E-03	1.33E-02	0.967
Sonda 9	0.93	0.922	0.94	0.937	0.45	1.12E-03	1.38E-02	0.964
Sonda 10	0.964	0.949	0.954	0.954				

Tabela A 2.2. Análise estatística da calibração da porosidade do manto secundário

Porosidade	Bias				RMS			
	0.25	0.3	0.35	0.4	0.25	0.3	0.35	0.4
Sonda 6	3.52E-03	2.65E-03	1.40E-03	1.36E-03	2.18E-02	1.93E-02	9.30E-03	9.26E-02
Sonda 7	3.71E-03	2.75E-03	1.90E-03	1.82E-03	7.30E-03	7.08E-03	7.00E-03	8.20E-03
Sonda 8	-5.67E-04	-1.28E-03	-1.90E-03	-1.82E-03	1.57E-02	1.33E-02	1.34E-02	1.57E-02
Sonda 9	4.81E-03	4.34E-03	3.20E-03	1.98E-03	1.81E-02	1.85E-02	2.22E-02	1.75E-02
Sonda 10	7.23E-03	4.64E-03	4.70E-03	4.56E-03	1.54E-02	1.29E-02	1.47E-02	1.43E-02
Porosidade	IC				Media			
	0.25	0.3	0.35	0.4		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.940	0.952	0.989	0.989	0.25	3.74E-03	1.57E-02	0.959
Sonda 7	0.982	0.983	0.983	0.992	0.3	2.62E-03	1.42E-02	0.966
Sonda 8	0.958	0.969	0.968	0.956	0.35	1.86E-03	1.33E-02	0.967
Sonda 9	0.962	0.960	0.94	0.963	0.4	1.69E-03	1.23E-02	0.971
Sonda 10	0.952	0.964	0.954	0.957				

Tabela A 2.3. Análise estatística da calibração da porosidade do núcleo

Porosidade	Bias				RMS			
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.2	0.25	0.3	0.35
Sonda 6	1.36E-3	1.36E-3	3.44E-3	3.56E-3	1.28E-2	9.26E-2	1.10E-2	1.14E-2
Sonda 7	1.82E-3	1.82E-3	3.18E-3	2.78E-3	7.47E-3	8.20E-3	6.44E-3	6.75E-3
Sonda 8	-1.82E-3	-1.82E-3	-9.96E-4	-1.40E-3	1.41E-2	1.57E-2	1.34E-2	1.29E-2
Sonda 9	1.98E-3	1.98E-3	2.43E-3	1.64E-3	1.67E-2	1.75E-2	1.73E-2	1.51E-2
Sonda 10	4.56E-3	4.56E-3	-3.47E-4	-1.51E-3	1.43E-2	1.43E-2	1.06E-2	9.62E-3
Porosidade	IC				Media			
	0.2	0.25	0.3	0.35		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.980	0.989	0.985	0.983	0.2	3.80E-3	1.31E-2	0.970
Sonda 7	0.981	0.992	0.986	0.985	0.25	1.69E-3	1.23E-2	0.971
Sonda 8	0.965	0.956	0.968	0.970	0.3	1.54E-3	1.17E-2	0.975
Sonda 9	0.966	0.963	0.963	0.971	0.35	1.01E-3	1.12E-2	0.977
Sonda 10	0.954	0.957	0.974	0.977				

Resultados da análise estatística da calibração coeficiente não linear

São apresentados os resultados da análise estatística para a calibração do coeficiente não linear, β . Cada tabela contém os resultados para todas as sondas e todos os β de cada manto.

Tabela A 2.4. Análise estatística da calibração de β do manto principal

	Bias			RMS			
Beta	0.70	0.90	1.10	0.70	0.90	1.10	
Sonda 6	3.56E-03	8.28E-04	1.38E-03	1.14E-02	9.49E-03	9.86E-03	
Sonda 7	2.78E-03	1.12E-03	2.31E-03	6.75E-03	6.74E-03	7.35E-03	
Sonda 8	-1.40E-03	-1.99E-03	-1.98E-03	1.29E-02	1.19E-02	1.24E-02	
Sonda 9	1.64E-03	3.47E-03	3.69E-03	1.51E-02	1.67E-02	1.54E-02	
Sonda 10	-1.51E-03	-1.91E-03	-3.52E-03	9.62E-03	9.98E-03	6.53E-03	
	IC			Media			
Beta	0.70	0.90	1.10		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.983	0.989	0.988	0.70	1.01E-03	1.12E-02	0.9773
Sonda 7	0.985	0.985	0.983	0.90	3.04E-04	1.10E-02	0.9779
Sonda 8	0.970	0.975	0.973	1.1	3.76E-04	1.03E-02	0.9802
Sonda 9	0.971	0.966	0.970				
Sonda 10	0.977	0.975	0.988				

Tabela A 2.5. Análise estatística da calibração de β do manto secundário

	Bias			RMS			
Beta	1.1	1.5	2.0	1.1	1.5	2.0	
Sonda 6	1.38E-03	9.81E-04	1.70E-03	9.86E-03	8.75E-03	1.03E-02	
Sonda 7	2.31E-03	1.40E-03	1.46E-03	7.35E-03	6.79E-03	6.11E-03	
Sonda 8	-1.98E-03	-2.71E-03	-2.70E-03	1.24E-02	1.18E-02	1.31E-02	
Sonda 9	3.69E-03	3.96E-03	3.80E-03	1.54E-02	1.60E-02	1.45E-02	
Sonda 10	-3.52E-03	-2.95E-03	-2.13E-03	6.53E-03	7.08E-03	4.25E-03	
	IC			Media			
Beta	1.1	1.5	2.0		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.988	0.9904	0.9866	1.1	3.76E-04	1.03E-02	0.9802
Sonda 7	0.983	0.9850	0.9879	1.5	1.37E-04	1.01E-02	0.9808
Sonda 8	0.973	0.9749	0.9692	2.0	4.26E-04	9.64E-03	0.9823
Sonda 9	0.970	0.9681	0.9731				
Sonda 10	0.988	0.9856	0.9946				

Tabela A 2.6. Análise estatística da calibração de β do núcleo

	Bias			RMS			
Beta	0.9	1.1	1.3	0.9	1.1	1.3	
Sonda 6	1.34E-03	1.70E-03	3.33E-03	9.68E-03	1.03E-02	1.09E-02	
Sonda 7	1.88E-03	1.46E-03	2.51E-03	6.97E-03	6.11E-03	5.76E-03	
Sonda 8	-2.18E-03	-2.70E-03	-2.02E-03	1.44E-02	1.31E-02	1.33E-02	
Sonda 9	4.57E-03	3.80E-03	4.04E-03	1.60E-02	1.45E-02	1.46E-02	
Sonda 10	-2.12E-03	-2.13E-03	-1.81E-03	6.23E-03	4.25E-03	4.05E-03	
	IC			Media			
Beta	0.9	1.1	1.3		Bias	RMS	IC
Sonda 6	0.9881	0.9866	0.9851	0.9	7.00E-04	1.07E-02	0.9784
Sonda 7	0.9844	0.9879	0.9891	1.1	4.26E-04	9.64E-03	0.9823
Sonda 8	0.9629	0.9692	0.9686	1.3	1.21E-03	9.72E-03	0.9821
Sonda 9	0.9681	0.9731	0.9726				
Sonda 10	0.9886	0.9946	0.9950				