



**Ronildo Duarte da Costa**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Modelação numérica 3D do galgamento numa estrutura de proteção marginal**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Civil

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito, Doutor, IST

Co-orientador: Maria da Graça Neves, Doutora, FCT-  
UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Arguente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Vogal: Prof. Doutora Maria da Graça Neves



**Modelação numérica 3D do galgamento numa estrutura de proteção marginal**

Copyright © Ronildo Duarte da Costa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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



*Aos meus pais.*



## Agradecimentos

Começo agradecendo a Professora Maria Graça Neves pela apresentação do tema, assim como pela orientação, revisão do texto e a forma como dispôs-se incansavelmente no acompanhamento e pelas sugestões importantes para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Moisés Gonçalves de Brito pela colaboração na apresentação do tema, orientação, sugestões e revisão do texto. Também agradeço pelos conselhos, principalmente pela disponibilidade e paciência demonstrada.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, particularmente ao Professor Luís Miguel Chagas Costa Gil por ter disponibilizado espaço e computador para realizações das simulações.

Ao "projeto" PROTOCOL – Protección de frentes urbanos costeros frente al calentamiento global", financiado pelo CYTED.

À FACIT, sobretudo a Professora Dr.<sup>a</sup> Maria Madalena Dionísio pelo apoio.

Ao Sr João Gabriel Corteze e à sua equipa do MySpot pelo apoio e atenção disponibilizada.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam durante esses anos, principalmente ao meu colega e amigo José Barros.

Por último, mas não menos importante, gostaria de encaminhar um agradecimento muito especial à minha família, particularmente aos meus pais e irmãos.

## Resumo

A inundação nas zonas costeiras tem sido um problema preocupante, que exige que o estudo e a escolha de solu es adequadas para mitigar o seu efeito seja feito criteriosamente, ainda mais se a soluço passa por aplica o simultaneamente de estruturas longitudinal (prote o marginal) e transversal (esporões). Uma das consequências esperadas das mudanças climáticas em Portugal continental   uma pequena altera o do ângulo de incidência de onda, que pode levar a altera es na ocorrência de galgamentos nas estruturas de prote o marginal.

Neste contexto, para estudar a influência da altera o do ângulo de incidência das ondas no galgamento de uma estrutura de prote o marginal localizada entre esporões, efetuou-se a modela o numérica 3D utilizando o modelo SPH. Para tal, o modelo foi validado inicialmente em 2D, onde se simulou uma estrutura marginal com diferentes rugosidades e/ou porosidades de forma a seleccionar qual a que mais se aproxima da resposta, ao nível de superfície livre e do galgamento, de uma estrutura de prote o marginal porosa, com base em ensaios em modelo físico anteriormente realizados.

Uma vez validado, o modelo foi aplicado, na sua versão 3D, e analisou-se a influência que tem no galgamento a altera o do ângulo de incidência da agita o provocada por possíveis altera es climáticas. Os resultados da eleva o de superfície livre e do caudal obtidos da modela o numérica 2D

apresentam boa concordância com os dados experimentais. Verificou-se que a geometria da estrutura influencia a elevação de superfície livre e o caudal levando à ocorrência de maior ou menor galgamento consoante a reflexão e dissipação na estrutura. O modelo na sua versão 3D reproduz fenómenos tais como a propagação, rebentação, espraiamento, galgamento e reflexão das ondas. Verificou-se que, para o caso em estudo, o galgamento aumenta com um pequeno aumento do ângulo de incidência das ondas.

**Palavras-chave:** Modelação numérica, 3D, *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), galgamento, estrutura da proteção marginal, esporão.

---

# Abstract

Flooding in coastal areas has been a worrying problem, requiring that the study and choice of an appropriate solution that mitigate its effect is done judiciously, even more if the solution is made by the simultaneous application of longitudinal (seawall) and transversal (groins). One of the expected consequences of climate change in Portugal is a small change in the angle of wave incidence, which may lead to changes in the occurrence of overtopping events over seawalls.

In this context, to study the influence of a change on the angle of wave incidence in the overtopping over a protection structure located between groins, 3D numerical modelling was performed using the SPH model. For this, the model was firstly validated in 2D, where a seawall with different roughnesses and / or porosities was simulated in order to select the geometry that gives the free surface elevation and overtopping closest to the response of the porous seawall previously tested in a physical model. The results of free surface elevation and overtopping obtained from 2D numerical modeling are in good agreement with the experimental data. It has been found that the geometry of the structure influences the free surface elevation and the overtopping.

Once validated, the model was applied in its 3D version, and the influence on the change in the wave angle caused by a possible climate change was analysed.

The 3D model reproduces the expected phenomena such as propagation, wave breaking, run-up, overtopping and wave reflection. It was found that, for the case under study, the overtopping increases with a small increase in angle of incidence of waves.

**Keywords:** Numerical modelling, 3D, Smoothed particle Hydrodynamics (SPH), overtopping, seawall, groins.

# Índice

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
INTRODUÇÃO .....	1
1.1. <i>Enquadramento do trabalho</i> .....	1
1.2. <i>Objetivos</i> .....	3
1.3. <i>Metodologia</i> .....	3
1.4. <i>Estrutura da dissertação</i> .....	4
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>7</b>
ESTRUTURAS MARÍTIMAS E GALGAMENTO .....	7
2.1. <i>Estruturas costeiras</i> .....	7
2.2. <i>Galgamento em estruturas costeiras</i> .....	11
2.2.1. Definição de galgamento em estruturas costeiras .....	11
2.2.2. Fatores ou parâmetros que condicionam o galgamento .....	14
2.2.2.1 Agitação marítima .....	14
2.2.2.2 Nível de maré.....	17
2.2.2.3 Geometria da estrutura .....	17
2.3. <i>Métodos de cálculo do galgamento</i> .....	18
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>21</b>
CÓDIGO DUALSHYSICS.....	21
3.1. <i>Introdução</i> .....	21
3.2. <i>Método SPH</i> .....	22

3.3. <i>Kernel de interpolação</i> .....	24
3.4. <i>Equação de conservação da massa e do balanço quantidade de movimento</i>	25
3.5. <i>Passo de tempo</i> .....	27
3.6. <i>Condições de fronteiras</i> .....	29
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>31</b>
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....	31
4.1. <i>Análise de sensibilidade</i> .....	31
4.2. <i>Validação do modelo numérico</i> .....	38
4.2.1. Descrição dos casos de estudo.....	38
4.2.2. Análise dos resultados.....	41
4.2.2.1 Resultado para $T = 2.19$ s e $H = 0.13$ m .....	42
4.2.2.2 Resultado para $T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m .....	43
4.2.2.3 Análise dos resultados.....	48
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>51</b>
MODELAÇÃO NUMÉRICA .....	51
5.1. <i>Modelão numérica 2D</i> .....	51
5.1.1. Análise de reflexão nas estruturas.....	51
5.1.2. Análise de influência da geometria simulada na superfície livre .....	53
5.1.3. Análise da influência da geometria no galgamento.....	56
5.2. <i>Modelação numérica 3D</i> .....	59
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>73</b>
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	73
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	75

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Perfil transversal de quebra-mares de talude de enrocamento: a) sem núcleo; b) com núcleo; (Takahashi, 2002).....	8
Figura 2.2 - Esporões retilíneos da Costa da Caparica (@Google Earth). ....	10
Figura 2.3 - Esporões com formas diferentes em Espinho (@Google Earth).....	11
Figura 2.4 - Esquema 2D do galgamento numa estrutura de proteção longitudinal aderente (Afonso, 2011). ....	12
Figura 2.5 - Esquema do espraçamento numa estrutura de proteção marginal .....	13
Figura 2.6 - Ângulo de incidência das ondas.....	16
Figura 2.7 - Variação do fator de redução do galgamento com o ângulo de incidência da agitação...17	
Figura 3.1 - Fluxograma da implementação: a) CPU, b) GPU adaptado de Crespo et al (2015). ....	22
Figura 3.2 - Partículas do domínio de influência do kernel que contribuem para a interpolação e suporte compacto do kernel (Didier e Neves, 2010b).....	23
Figura 4.1 - Representação do perfil longitudinal do canal e da posição das sondas usadas na análise de sensibilidade. ....	32
Figura 4.2 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2. ....	34
Figura 4.3 - Elevação de superfície livre na sonda Wg3. ....	34
Figura 4.4 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4. ....	35
Figura 4.5 - Altura significativa nas sondas para as variações da densidade inicial de partícula.....	36
Figura 4.6 - Campo de velocidade na proximidade da estrutura para tempo de simulação de 37 s e para $d_p = 0.05$ m, $d_p = 0.03$ m e $d_p = 0.01$ m.....	37
Figura 4.7 - Perfil transversal da estrutura experimental (Viegas, 2014).....	39

Figura 4.8 - Estrutura de superfície: a) lisa; b) rugosa; c) porosa (1); d) porosa (2); e) rugosa-porosa.....	40
Figura 4.9 - Representação esquemático do perfil longitudinal com posicionamento das sondas. ...	40
Figura 4.10 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa. ....	42
Figura 4.11 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa. ....	42
Figura 4.12 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2). ....	43
Figura 4.13 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2). ....	43
Figura 4.14 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa. ....	44
Figura 4.15 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa. ....	45
Figura 4.16 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa. ....	45
Figura 4.17 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa. ....	45
Figura 4.18- Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (1). ....	46
Figura 4.19 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (1). ....	46
Figura 4.20- Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2). ....	46
Figura 4.21- Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2). ....	47
Figura 4.22- Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa-porosa. ....	47
Figura 4.23- Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa-porosa. ....	47
Figura 5.1 - Distância entre as sondas no método de separação de espectro incidente e refletida adaptado de (Mestre, 2015) .....	52
Figura 5.2 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg2 para $T = 2.19$ s e $H = 0.13$ m. ....	54

Figura 5.3 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg4 para $T = 2.19$ s e $H = 0.13$ m.....	54
Figura 5.4 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg2 para $T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m.....	54
Figura 5.5 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg4 para $T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m.....	55
Figura 5.6 - Volume galgado ao longo do tempo para condição de agitação $T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m.....	57
Figura 5.7 - Estruturas do caso de estudo, na costa de Cova Gala (@Google Earth).....	59
Figura 5.8 - Perfil transversal central do tanque numérico, com a representação da estrutura de proteção marginal.....	60
Figura 5.9 - Tanque numérico utilizado nas simulações para $\beta = 0^\circ$ , com indicação das fronteiras laterais, da estrutura de proteção marginal, dos esporões e da batimetria simulada .....	61
Figura 5.10 - Tanque numérico utilizado nas simulações para $\beta = 20^\circ$ , com indicação das fronteiras laterais, da estrutura de proteção marginal, dos esporões e da batimetria simulada .....	61
Figura 5.11 - Disposição das partículas na interação onda-estrutura 3D nas proximidades da estrutura para $\beta = 0^\circ$ .....	63
Figura 5.12 - Disposição das partículas na interação onda-estrutura 3D nas proximidades da estrutura para $\beta = 20^\circ$ .....	64
Figura 5.13 - Posicionamento dos pontos e dos planos ao longo do canal.....	66
Figura 5.14 - Elevação de superfície livre no ponto S1 obtida na simulação 3D .....	66
Figura 5.15 - Elevação de superfície livre no ponto S2 obtida na simulação 3D .....	66
Figura 5.16 - Elevação de superfície livre no ponto S3 obtida na simulação 3D .....	67
Figura 5.17 - Perfil longitudinal da superfície livre no plano P1 .....	67
Figura 5.18 - Perfil longitudinal da superfície livre no plano P2 .....	67
Figura 5.19 - Perfil longitudinal da superfície livre do plano P3.....	68
Figura 5.20 - Representação do galgamento localizado na estrutura de proteção marginal para $t = 35.7$ s com $\beta = 20^\circ$ .....	69
Figura 5.21 - Volume galgado ao longo do tempo .....	70
Figura 5.22 - Representação da velocidade e do galgamento numa zona concreta da estrutura de proteção marginal para $\beta = 20^\circ$ .....	71
Figura 5.23- Representação da velocidade e do galgamento ao longo da estrutura de proteção marginal para $\beta = 0^\circ$ .....	71
Figura 5.24 - Edifício localizado junto à estrutura de proteção marginal da Praia de Cova, numa zona entre dois esporões.....	72



## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Parâmetros numéricos usados no estudo .....	32
Tabela 4.2 - Condição de agitação utilizada na análise de sensibilidade .....	33
Tabela 4.3 - Variação da distância inicial entre partículas .....	33
Tabela 4.4 - Posicionamento das sondas ao longo do canal e estrutura .....	41
Tabela 4.5 - Condições de agitação utilizadas na validação numérica .....	41
Tabela 4.6 - Altura significativa obtida no Modelo SPH e no ensaio experimental .....	44
Tabela 4.7 - Cálculo das diferenças entre as séries temporais numéricas e experimentais .....	49
Tabela 4.8 - Caudal médio galgado, $Q$ , na diferente estrutura simuladas .....	50
Tabela 5.1 - Coeficiente de reflexão para diferentes estruturas simuladas .....	53



# Abreviaturas e Simbologia

## Abreviaturas

CFL	Courant – Friedrich – Levy
CPU	Central Processing Unit
DBC	Dynamic Boundary Condition
EL	Estrutura Lisa
EP1	Estrutura Porosa (1)
EP2	Estrutura Porosa (2)
ER	Estrutura Rugosa
ERP	Estrutura Rugosa-Porosa
GPU	Graphics Processing Unit
LNEC	Laboratório Nacional Engenharia Civil
NMA	Nível Médio da Água
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

## Simbologias

$C$	Coefficiente adimensional do caudal galgado
$c$	Velocidade de som
$d$	Profundidade de água no canal
$d_s$	Profundidade no pé da estrutura
$d_p$	Distância inicial entre as partículas
$g$	Aceleração gravítica
$H$	Altura da onda
$H_s$	Altura significativa da onda
$H_{m0}$	Altura da onda significativa espectral
$h$	Smoothing length ou dimensão do suporte $W$
$K$	Distância adimensional entre as partículas
$K_r$	Coefficiente de reflexão
$L$	Comprimento de onda
$m$	Massa das partículas
$O_r$	Fator de redução do galgamento
$P$	Pressão
$q$	Caudal médio galgado por metro linear da estrutura
$R_c$	Distância entre a cota de coroamento da estrutura e o NMA
$R_u$	Espraiamento
$R_{u2\%}$	Espraiamento com 2% de probabilidade de ser transcendida
$\mathbf{r}$	Vetor posição da partícula
$s$	Declividade da onda
$T$	Período da onda
$t$	Tempo
$V$	Volume
$\mathbf{v}$	Velocidade
$W$	kernel de interpolação
$\beta$	Ângulo de incidência da onda
$\alpha$	Declive do talude da estrutura

$\varepsilon$	Variante XSPH
$\xi$	Número de Iribarren
$\mu$	Coeficiente de viscosidade
$\rho$	Massa volúmica das partículas
$\theta$	Termo viscoso
$\eta$	Superfície livre
$\gamma$	Constante politrópica
$\gamma_r$	Coeficientes de redução de rugosidade ou permeabilidade da superfície de estrutura
$\gamma_h$	Coeficientes de redução de baixas profundidade no pé da estrutura
$\gamma_b$	Coeficientes de redução da existência de berma
$\gamma_\beta$	Coeficiente de redução do ângulo de incidência da onda
$\Delta t$	Passo de tempo
$\Delta t_{cv}$	Passo de tempo que controla a condição de CFL
$\Delta t_f$	Passo de tempo calculado a partir do vetor da força por unidade de massa
$\Pi_{ab}$	Termo de viscosidade artificial



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Enquadramento do trabalho

Há cada vez mais usos e atividades económicas nas zonas costeiras, com funcionalidades e objetivos diferentes. Assim, nestas zonas há inumeráveis infraestruturas de relevante importância económica, patrimonial ou mesmo urbanística, pessoas e outros bens, que se tornam por vezes vulneráveis às ações dinâmicas do mar, especialmente durante o inverno marítimo, que é o período que apresenta maior número de dias com temporais (Costa *et al.*, 2001). O correto conhecimento dos fenómenos que ocorrem na costa é importante quando se pretende implementar uma solução de proteção costeira que mitigue os efeitos de situações que põem em risco a integridade física das pessoas ou perdas de bens materiais. Para proteger estas zonas recorre-se frequentemente à construção de estruturas de proteção adaptadas aos objetivos pretendidos.

As estruturas, tais como quebra-mares ou esporões, têm vindo a ser utilizadas desde há muito tempo como um meio de proteção fiável nas estratégias de diminuição de riscos de galgamentos e inundação nas zonas costeiras. Porém, com as espectáveis alterações climáticas, pode haver a necessidade da implantação de novas obras ou de adaptação das estruturas existentes.

As consequências mais relevantes das alterações climáticas no litoral de Portugal Continental são, segundo Andrade *et al.* (2008), o aumento do nível médio do mar e a alteração do regime de agitação marítima, com a rotação em sentido horário do rumo médio das ondas ao largo. Estes autores julgam prudente adotar, para o horizonte temporal de 2100, e devido às alterações climáticas, um aumento médio do nível de água do mar de cerca de 1 metro. No entanto, este aumento do nível de água do mar poderá ser mais rápido do que previsto, evidenciando a necessidade de garantir a segurança nas zonas

costeiras procurando, para tal, soluções adequadas às eventuais novas situações ou adaptando convenientemente as estruturas existentes. Com estas soluções pretende-se diminuir o impacto da agitação e de possíveis galgamentos e consequente inundação costeira, aquando da ocorrência de tempestades ou devido a possíveis alterações climáticas, tais como o aumento do nível de água do mar ou a alteração do ângulo de incidência da agitação nas obras.

O correto dimensionamento das obras costeiras é importante para que estas apresentem o desempenho pretendido, já que o sobredimensionamento destas estruturas pode levar a custos avultados desnecessários e, pelo contrário, o seu subdimensionamento pode levar a custos mais elevados de manutenção, reparação ou mesmo custos de reconstrução (Martins, 2011). Para tal, é necessário conhecer e compreender todos os fenómenos envolvidos na interação da onda com as estruturas.

Atualmente, para apoiar o estudo de interação da onda com a estrutura, existem diferentes tipos de modelos numéricos, que utilizam métodos baseados na abordagem Lagrangiana (sem malha) ou métodos baseados na abordagem Euleriana (com malha fixa e/ou móvel). Alguns destes modelos encontram-se atualmente em desenvolvimento, e têm campos de aplicação, vantagens e inconvenientes diferentes.

De entre os métodos baseados na abordagem Lagrangiana, o método SPH tem sido o mais usado (Crespo et al., 2015). Este método tem sido amplamente aplicado ao estudo de escoamento com superfície livre, em particular no estudo da interação onda-estrutura. Um dos códigos que se encontra atualmente em desenvolvimento é o DualSPHysics. Este código resulta da colaboração de um grupo internacional de investigadores das universidades Johns Hopkins (EUA), de Vigo (Espanha), de Manchester (Reino Unido) e de Roma La Sapienza (Itália). O código DualSPHysics é um modelo numérico bi (2D) e tridimensional (3D). O DualSPHysics baseia-se no método SPH para resolver as equações da dinâmica dos fluidos. Neste método o fluido é considerado como sendo um conjunto de partículas (Monaghan, 1992). As trajetórias e as velocidades das

partículas do fluido em função da sua posição inicial e do tempo são dadas pelo seguimento de cada partícula durante um determinado período de tempo. Portanto, neste método para descrever a dinâmica dos fluidos não é necessária uma malha de cálculo (Lucy, 1977; Gingold e Monaghan, 1977). O movimento individual de cada partícula é obtido a partir do movimento das partículas que estão à sua volta (partículas vizinhas). Numericamente as interações entre as partículas são asseguradas por um kernel de interpolação (Monaghan, 1992). Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão do suporte do kernel e cada uma destas partículas tem apenas uma contribuição no kernel. O código DualSPHysics vem sendo validado e melhorado ao longo dos últimos anos com o objetivo de modelar fenômenos complexos, como escoamentos com grandes deformações da superfície livre, evoluções topológicas complexas, rebentação e interação onda-estrutura (Crespo et al., 2015, Brito, 2017).

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação é analisar a influência do ângulo de incidência das ondas no galgamento de uma estrutura de proteção marginal localizada entre dois esporões através do método SPH. Este método está atualmente implementado no código DualSPHysics o que permite simular em 2D diferentes tipos de estruturas, tais como estruturas lisa, rugosa, porosa e rugosa-porosa. Assim, é também objetivo validar a versão 2D do modelo com base em ensaios anteriormente realizados de galgamento de uma estrutura porosa e, uma vez validado, aplicá-lo na sua versão 3D.

## **1.3. Metodologia**

A metodologia adotada compreende inicialmente a modelação numérica 2D para validação do modelo com base em ensaios de galgamento já realizados de uma estrutura de proteção costeira. Com esta validação pretende-se definir a porosidade/rugosidade da estrutura em estudo e ainda alguns parâmetros do

modelo, tais como a distância inicial entre partículas. Após a sua validação em 2D, aplica-se o modelo em 3D ao estudo do galgamento de uma estrutura de proteção marginal entre esporões, para uma condição de agitação definida, variando o ângulo de incidência da agitação.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos: Introdução; Revisão bibliográfica; Modelo numérico; Análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos e validação do modelo numérico; Modelação numérica e Conclusões e trabalhos futuros.

No **Capítulo 1** apresenta-se o enquadramento do trabalho, os principais objetivos, metodologia e a estrutura da dissertação.

No **Capítulo 2** faz-se uma revisão bibliográfica de temas com relevância para o desenvolvimento desta dissertação. Nesta revisão bibliográfica descrevem-se sucintamente as estruturas costeiras em estudo, o fenómeno do galgamento e a aplicação do método SPH no estudo do galgamento em estruturas costeiras.

No **Capítulo 3** apresenta-se o código DualSPHysics e o método SPH. Também se descrevem alguns parâmetros numéricos, tais como o Kernel de interpolação e o passo de tempo.

No **Capítulo 4** descreve-se a análise de sensibilidade efetuada com o código DualSPHysics à distância inicial entre partículas e apresenta-se a validação do modelo ao estudo da interação de ondas com uma estrutura costeira porosa para a qual se dispõe de dados de ensaios 2D. Com base na modelação numérica 2D, foi possível definir os principais parâmetros a utilizar no modelo 3D.

No **Capítulo 5** apresenta-se, inicialmente, a modelação numérica 2D, com uma análise de reflexão das estruturas e de influência da geometria de estrutura na superfície livre e no galgamento. Apresenta-se o caso de estudo, uma estrutura de proteção marginal localizada entre dois esporões, e descreve-se a aplicação

do modelo em 3D a este caso e apresentam-se e discutem-se os resultados numéricos da influência do ângulo de incidência das ondas no galgamento.

No **Capítulo 6** apresentam-se as principais conclusões obtidas e algumas linhas de possíveis trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Estruturas marítimas e galgamento

No presente capítulo descreve-se sucintamente uma estrutura marítima, centrando-se nas estruturas de proteção marginal e esporões. Neste sentido, para uma melhor compreensão, começa-se por se definir as estruturas marítimas em geral, apresentam-se as suas principais funções e classificam-se quanto à deformabilidade e disposição relativamente à costa.

Por último são descritos o fenómeno de galgamento e a aplicação do método SPH no estudo do galgamento destas estruturas.

### 2.1. Estruturas costeiras

As estruturas marítimas têm como principal função proteger as zonas vulneráveis das ações da agitação, reduzindo os galgamentos, o recuo da linha da costa ou o avanço do mar em direção à frente urbana ou criar zonas de abrigo.

Estas estruturas têm sido utilizadas ao longo do tempo, principalmente em zonas portuárias, com objetivo de criar zonas de abrigo para embarcações, permitindo que atraquem em segurança. Os quebra-mares são as estruturas normalmente construídos para criar zonas abrigadas à agitação, e consistem num obstáculo à propagação normal de ondas de gravidade geradas pelo vento sobre a superfície da água (Pita, 1986), com o objetivo de proteger as entradas das bacias portuárias das ondas e correntes marítimas dissipando e ou refletindo a energia das mesmas (USACE, 2006).

Os quebra-mares mais usuais são os quebra-mares de talude, com perfil transversal trapezoidal, em que o talude é construído com enrocamento ou com blocos de betão pré-fabricado, dispostos de forma regular ou irregular. A solução com blocos de betão melhora as suas características quanto à resistência

permitindo a sua implantação em zonas mais profundas e de exposição energética maior. Estas estruturas caracterizam-se pela sua relativa eficácia na dissipação da energia das ondas por rebentação, atrito, percolação entre camadas porosas do manto e pela sua fácil construção. Para aumentar a estabilidade e diminuir a transmissão da onda, bem como reduzir o custo com os materiais de construção, é usual optar-se por um quebra-mar com um talude composto por várias camadas e com um núcleo de enrocamento (Figura 2.1), (Takahashi, 2002). A camada externa do talude designa-se de manto resistente, e onde se dá o impacto das ondas incidentes (Ferreira, 2016).

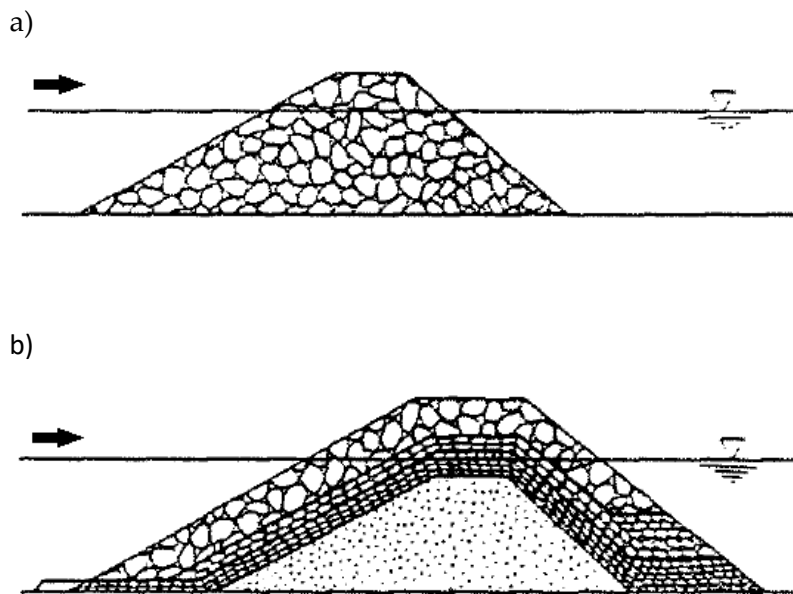


Figura 2.1 - Perfil transversal de quebra-mares de talude de enrocamento: a) sem núcleo; b) com núcleo; (Takahashi, 2002).

A utilização de estruturas marítimas em zonas litorais desenvolveu-se essencialmente no século XX, na sequência da ocupação do litoral, ultimamente mais para fins turísticos. O seu principal objetivo é o de proteger a costa e/ou mitigar os efeitos da erosão. Estas estruturas podem ser classificadas quanto à sua deformabilidade como rígidas ou flexíveis. A estrutura flexível é dimensionada tendo em conta as variações espaciais e temporais da estrutura ao longo da sua vida útil, enquanto a estrutura rígida é dimensionada para que

a sua geometria se mantenha praticamente inalterada ao longo da sua vida útil. Uma estrutura rígida pode ainda admitir uma certa deformação ao longo da sua vida útil sem que esta seja considerada como colapso da estrutura. Um exemplo de uma estrutura rígida é um muro de betão ou um quebra-mar de talude com um manto mono-camada enquanto o exemplo de estrutura flexível é um quebra-mar em “S” (GIOC, 2000).

As estruturas de proteção costeira rígidas, de acordo com a sua posição relativa à linha de costa, podem ser de dois tipos: transversais e longitudinais. As estruturas transversais encontram-se dispostas normalmente perpendiculares ou oblíquas à linha de costa, como, por exemplo, os esporões. As estruturas longitudinais encontram-se dispostas paralelas à linha de costa, como, por exemplo, as estruturas de proteção marginal. As estruturas do tipo rígidas podem ser ainda aderentes, localizando-se na praia emersa, como é o caso das estruturas de proteção marginal, ou destacadas, situando-se “ao largo”, sem ligação a terra, como acontece com os quebra-mares destacados. Como cada um desses tipos de estruturas apresenta funcionalidades distintas, é possível a implementação simultânea de várias dessas estruturas de forma a garantir a diminuição do galgamento e erosão nas zonas costeiras.

As estruturas longitudinais aderentes são dispostas paralelamente à linha da costa, com o principal objetivo de minimizar as possíveis inundações devido ao galgamento de ondas resultantes das tempestades e da agitação marítima. São ainda utilizadas para delimitar arruamentos e/ou aterros marginais, proteção de estradas ou habitações (Afonso, 2011). Podem ser construídas por diversos materiais (betão, madeira, blocos de rocha, gabiões, blocos artificiais de betão ou materiais metálicos) e a forma como se dispõe estes materiais tornam-nas permeáveis ou impermeáveis e/ou rugosas ou não rugosas. Podem ainda apresentar perfis transversais do tipo vertical, quando se pretende essencialmente a reflexão da energia das ondas, ou perfis com dado declive, em degraus ou côncavo, quando se pretende que haja também alguma dissipação da energia das ondas no talude.

As estruturas transversais desenvolvem-se normalmente perpendicularmente à linha da costa, com o objetivo principal de reter os sedimentos, diminuindo assim a erosão das praias. As estruturas transversais mais utilizadas em Portugal são os esporões, que são em geral retilíneos (Figura 2.2), e semelhantes a um quebra-mar de talude de enrocamento, diferindo destes no ângulo de ataque das ondas. Consequentemente, a ação da agitação é menor que a do quebra-mar de talude, visto ser quase perpendicular à linha de costa, não estando sujeita a grande impacto das ondas.



**Figura 2.2 - Esporões retilíneos da Costa da Caparica (@Google Earth).**

Os esporões podem ter diferentes formas, com geometria em T, L ou mais complexas, do tipo curvilíneas em Z ou ondulada. Um exemplo de esporões em L é o apresentado na Figura 2.3. Os esporões podem ainda ser do tipo permeáveis (permitindo que a água e algum sedimento os atravesse) ou impermeáveis (o que reforça a reflexão do escoamento), podendo a parte superior da estrutura (coroamento) estar emersa ou submersa ou ter uma parte emersa e outra submersa. A sua permeabilidade depende do tipo de materiais utilizados na construção dos mantos. Normalmente, na proteção da costa, estes tipos de estruturas são construídos em grupos, designados por campos de esporões. O comprimento, a cota de coroamento e o espaçamento entre esporões são condicionados pela amplitude da maré, pela energia da onda incidente e pelo declive da praia. A proteção com esporões pode ou não ser

conjugada com obras longitudinais aderentes e, em certos casos, com alimentação artificial da praia (Integrada, 2018).



Figura 2.3 - Esporões com formas diferentes em Espinho (@Google Earth).

## 2.2. Galgamento em estruturas costeiras

### 2.2.1. Definição de galgamento em estruturas costeiras

A interação onda-estrutura origina, por vezes, o fenómeno de galgamento. Este fenómeno é definido como a passagem de um dado volume de água sobre o coroamento duma estrutura por unidade de tempo. Um esquema da vista lateral do galgamento encontra-se apresentada na Figura 2.4. Usualmente o galgamento é quantificado através do volume,  $V$ , de água que galga a estrutura ou através do caudal médio,  $q$ , por metro linear de largura da estrutura num determinado período de tempo, em  $m^3/s/m$  ou em  $l/s/m$ .

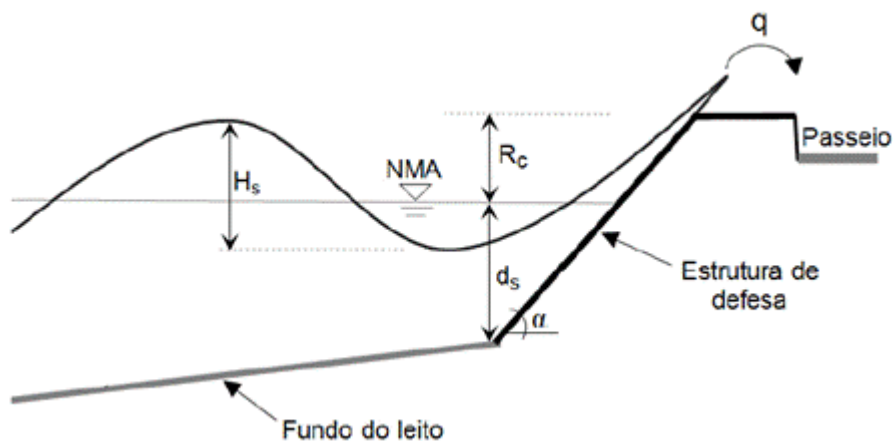


Figura 2.4 – Esquema 2D do galgamento numa estrutura de proteção longitudinal aderente (Afonso, 2011).

O caudal galgado pode ser expresso por diferentes formulações, sendo as mais frequentes as seguintes:

$$Q = Ae^{-(BR)} \quad (2.1)$$

$$Q = AR^{-B} \quad (2.2)$$

onde  $A$  e  $B$  são coeficientes com valores tabelados (Burcharth e Hughes, 2005), que variam consoante a geometria da estrutura,  $Q$  e  $R$  são os respetivos valores adimensionalizados do caudal galgado e da distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento da estrutura.

O galgamento está ainda diretamente relacionado com o fenómeno do espraiamento,  $R_u$  (Figura 2.5), que é a cota máxima atingida por uma onda ao interagir com a estrutura marítima ou costeira, relativamente a nível medio da água. Quando o nível de espraiamento é maior que a cota do coroamento, ocorre galgamento. Portanto a estimativa deste parâmetro é muito importante para o cálculo de galgamento, que por sua vez é indispensável no dimensionamento da estrutura, principalmente na determinação da cota do coroamento das estruturas.

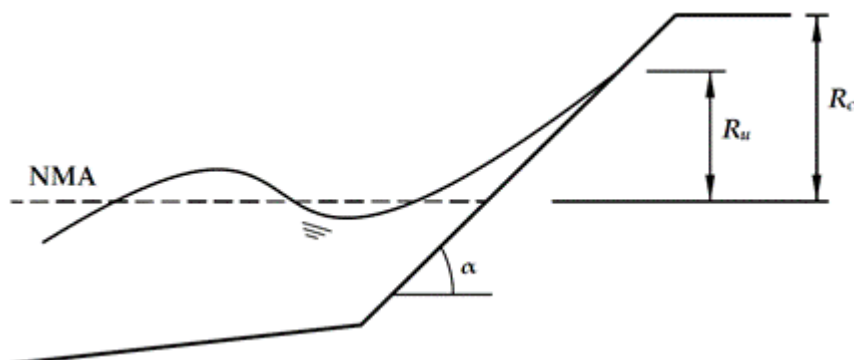


Figura 2.5 – Esquema do espraioamento numa estrutura de proteção marginal

A cota de coroamento é normalmente definida considerando o espraioamento com 2% de probabilidade de ser excedido dividido pela altura de onda significativa,  $R_{u2\%}/H_s$ . Waal and Meer (1992) apresentaram, para estruturas costeiras de superfícies com inclinação suave e impermeáveis, a seguinte relação para o cálculo deste parâmetro:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1.6\xi\gamma_r\gamma_h\gamma_b\gamma_\beta \quad (2.3)$$

onde  $R_{u2\%}$  é o espraioamento com 2% de probabilidade de ser excedido e  $\xi$  é o número de Iribarren,  $\gamma_r$  é o coeficiente de redução devido à rugosidade ou permeabilidade,  $\gamma_h$  é o coeficientes de redução devido à baixas profundidade em frente uma dada estrutura,  $\gamma_b$  é o coeficiente de redução devido existência de berma, e  $\gamma_\beta$  é o coeficientes de redução devido ao ângulo de incidência da onda.

A forma e a quantidade de massa líquida que passa sobre a estrutura classificam os tipos de galgamentos existentes. A primeira forma é designada por “green water” e representa a transposição de uma lâmina contínua de água sobre a superfície do coroamento da estrutura. Como referido anteriormente, este caso corresponde a um nível de espraioamento superior à cota de coroamento da estrutura. A segunda forma é denominada por “splash” e a transposição ocorre sob forma de salpicos devido a volumes de água produzidos durante a fase de rebentação das ondas sobre a estrutura. A terceira

forma designa-se por “*spray*”, forma menos significativa, embora por vezes importante, uma vez que a transposição corresponde à passagem de “borrifos” gerados pela ação do vento.

A avaliação do galgamento numa estrutura não é trivial, pois está condicionada por diversos fatores que influenciam a interação onda-estrutura e, conseqüentemente, o galgamento. Apresentam-se de seguida os principais parâmetros ou fatores que condicionam o galgamento: a agitação marítima (incluindo o ângulo de incidência da agitação), a geometria da estrutura, o nível de maré.

## **2.2.2. Fatores ou parâmetros que condicionam o galgamento**

### **2.2.2.1 Agitação marítima**

A agitação marítima é um dos fatores com maior influência no galgamento. A análise dos efeitos da agitação no galgamento é muito complexa devido aos processos de transformação e dissipação da energia que ocorrem devido à interação da onda com o fundo do mar e à interação onda-estrutura.

As ondas que se consideram no dimensionamento de obras marítimas são as geradas pelo vento, também denominadas por ondas gravíticas. Estas ondas são geralmente definidas pela sua altura, período e direção de incidência. A altura da onda,  $H$ , é a distância vertical da crista até à cava. O período da onda,  $T$ , é o tempo entre a passagem de duas zonas homólogas da onda, por exemplo, duas cristas sucessivas passando por um determinado ponto (USACE, 1984). Com base nestes parâmetros, podem-se definir outros, igualmente importantes: o comprimento de onda,  $L$ , que é a distância horizontal entre duas zonas homólogas da onda, por exemplo, entre duas cristas sucessivas e a declividade da onda,  $s$ , definida da seguinte forma:

$$s = \frac{H}{L} \quad (2.4)$$

onde  $L$  é dado a partir da seguinte relação de dispersão:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.5)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade, e  $d$  é a profundidade da água.

Para águas profundas  $\left(\frac{H}{L} > \frac{1}{2}\right)$ , a parcela  $\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$  da Equação (2.5) tende para unidade, então  $L$ , passa a ser apenas função do  $T$  :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.6)$$

Para avaliar a forma da rebentação da onda sobre um talude, o parâmetro normalmente utilizado é o número de Iribarren,  $\xi$ . Este número relaciona o declive do talude da estrutura ou da praia,  $\tan\alpha$ , com,  $s$  da seguinte forma:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.7)$$

sendo o  $s$  calculado com o valor de  $L$  em águas profundas.

De acordo com o Manual Coastal Engineering (USACE, 2003), para  $\xi < 0.5$ , a rebentação da onda é progressiva, isto é, rebentação dá-se de forma contínua, em que a crista se deforma e desestabiliza, criando uma leve espuma. Este tipo de rebentação ocorre frequentemente em praias de pequeno declive.

Para  $0.5 < \xi < 3$ , a crista da onda dobra-se em voluta e “cai” sobre o talude originando grandes salpicos, sendo a rebentação designada por rebentação mergulhante.

Para  $\xi > 3$  a 3.5 diz-se que a rebentação é colapsante. Este tipo de rebentação surge do cruzamento entre os dois tipos de rebentação referidos anteriormente, onde a crista não rebenta inteiramente, não origina grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude.

Considera-se ainda o caso em que a onda apresenta pouca declividade relativamente ao declive do fundo, ou seja, para um elevado número de Iribarren ( $\xi > 3.5$ ), onde a onda se deforma e espria sobre o talude, avançando

sem rebentar. Estas ondas apresentam rebentação de Fundo e uma forte reflexão.

Outro parâmetro importante da agitação marítima é o ângulo de incidência das ondas, que corresponde ao ângulo entre a direção de propagação das ondas e a direção perpendicular à estrutura,  $\beta$  (Figura 2.6). Segundo alguns autores (Besley, 1999) o aumento do ângulo de incidência das ondas, em grande parte dos casos, diminui a possibilidade de ocorrência de galgamento nas estruturas de proteção, sendo a situação mais gravosa a da agitação que incide perpendicular à estrutura, isto é, quando  $\beta = 0$ .

Este fator ou parâmetro, como anteriormente referido, é o objeto de estudo desta dissertação. Pretende-se analisar a influência que tem no galgamento de uma estrutura de proteção costeira uma pequena variação no ângulo de incidência da agitação.

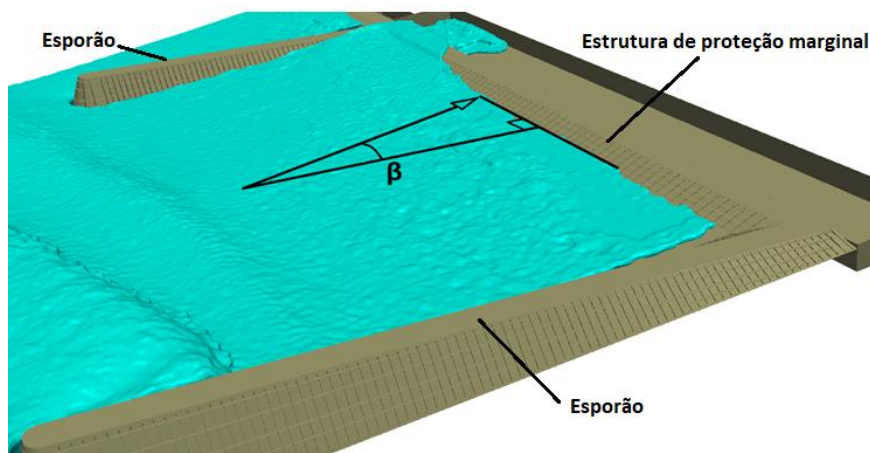


Figura 2.6 - Ângulo de incidência das ondas.

Banyard e Herbert (1995) desenvolveram uma equação para estimar o fator de redução,  $O_r$ , do galgamento sobre uma determinada estrutura de proteção marginal quando a agitação incide com um dado,  $\beta$  (Besley, 1999) dada por:

$$O_r = 1 - 0.000152\beta^2 \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) é válida para  $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ . A Figura 2.7 apresenta a variação do fator de redução do galgamento para  $\beta \in [0^\circ ; 60^\circ]$

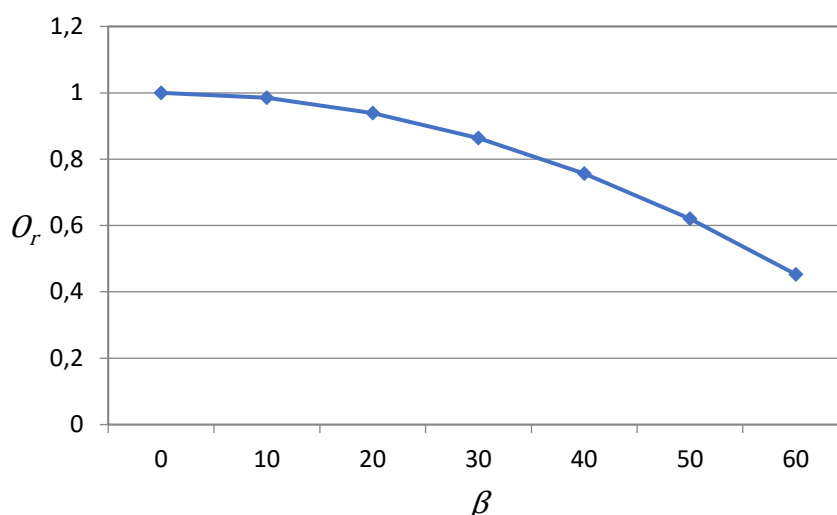


Figura 2.7 - Variação do fator de redução do galgamento com o ângulo de incidência da agitação.

### 2.2.2.2 Nível de maré

A maré é um fenômeno causado por fatores astronômicos, mais concretamente pela atração gravitacional do sol e da lua, provocando alteração no nível do mar. Normalmente, a um nível de maré mais elevado corresponde um maior galgamento, agravado quando se combina com situações de tempestade, fazendo com que a distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento seja menor e que haja uma maior probabilidade de ocorrência de galgamentos.

### 2.2.2.3 Geometria da estrutura

A geometria da estrutura é um dos fatores essenciais no controlo do galgamento. Portanto, a distância entre o nível repouso e a cota de coroamento, a rugosidade e a permeabilidade do talude e da berma, a inclinação do talude e a largura da berma do coroamento devem ser minuciosamente analisados a fim de se escolher os que permitem minimizar o galgamento. A rugosidade e a permeabilidade têm um papel importante na dissipação da energia da onda incidente na estrutura, ou seja, quanto maiores são estes parâmetros maior será a perda de energia das ondas na sua interação com a estrutura e, conseqüentemente, menor é o galgamento.

Estes parâmetros de geometria da estrutura, se possível, devem ser estudados independentemente, de forma a analisar a sua influência no galgamento e, por fim, devem-se fazer combinações destes de forma a obter uma geometria de estrutura o mais económica e segura possível.

### **2.3. Métodos de cálculo do galgamento**

Atualmente os riscos de inundações em zonas costeiras são bastante analisados, principalmente devido às possíveis consequências das alterações climáticas. Portanto, no dimensionamento das estruturas de proteção marginal, a quantificação da probabilidade de ocorrência de galgamento é um dos fatores analisados, de forma a escolher a geometria da estrutura que melhor permite mitigar o seu efeito. Estimar o valor de galgamento mais próximo da realidade significa dimensionar corretamente a estrutura de proteção, permitindo apenas probabilidades de galgamentos abaixo dos admissíveis, salvo em casos extremos de tempestade.

Para o cálculo do galgamento conta-se com inúmeras ferramentas, entre elas expressões empíricas, semi-empíricas, modelação física e numérica.

O método de cálculo mais utilizado pelos projetistas é o baseado em expressões empíricas e semi-empíricas. As expressões empíricas (e.g. Van der Meer et al., 1998; Besley, 1999; Pullen et al., 2007) são obtidas do ajuste de curvas a dados de modelos físicos, usando o método dos mínimos quadrados ou outros métodos de ajuste. As expressões semi-empíricas (e.g. Hedges e Reis, 1998, 2004; Reis et al., 2008) são deduzidas a partir de considerações teóricas e calibradas com base em resultados de ensaios em modelo físico.

Estas expressões são fáceis de utilizar e são de grande eficácia e rapidez na determinação de caudal médio galgado. No entanto, estão limitadas a um número restrito de configurações, às condições de agitação marítima, do nível de maré e do ângulo de incidência das ondas, entre outros parâmetros, considerados nos ensaios em modelo físico que serviram de base ao seu desenvolvimento.

EurOtop (2016) sugere, para estruturas de proteção marginal inclinadas lisas, onde  $R_c$  pode tomar valores muito baixos ou mesmo zero, que o caudal galgado seja calculado pela fórmula de Van der Meer e Bruce (2014), dada por:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = A \exp \left[ - \left( B \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^C \right]; R_c \geq 0 \quad (2.9)$$

onde  $q$  é o caudal medio galgado,  $H_{m0}$  é altura da onda significativa espectral,  $A$  e  $B$  são coeficientes empíricos que variam com a geometria da estrutura e  $C$  é o coeficiente adimensional do caudal galgado,  $C = 1$  para uma estrutura inclinada.

Recentemente, outro tipo de ferramentas empíricas que têm sido preponderantes na determinação do galgamento são as redes neuronais (Coeveld *et al.*, 2005). Para aprimorar esta ferramenta foi desenvolvido, no âmbito do Programa Europeu CLASH (Coeveld *et al.*, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005) a ferramenta de cálculo NN\_OVERTOPPING2. Esta ferramenta baseia-se na análise de 700 redes neuronais. Coeveld *et al.*, (2005) recomendam, no entanto, o recurso a modelação física na fase final do projeto para confirmar os resultados obtidos tanto das expressões empíricas tradicionais como pelas redes neuronais.

Recentemente, devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento dos modelos numéricos, a modelação numérica tornou-se cada vez mais eficiente e precisa. Portanto, o uso dos modelos numéricos tornou-se cada vez mais atrativo, pois a modelação numérica é mais flexível (quer em termos de condições de agitação, quer relativamente à geometria das estruturas) e é mais barata que a modelação física. No entanto, para que as simulações efetuadas sejam realistas, os modelos devem ser capazes de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficientes para gerar resultados consistentes (Reis e Neves, 2011).

Os modelos numéricos existentes para o estudo do galgamento baseiam-se no método da malha (Euleriano) e método sem malha (Lagrangiano). Os métodos

Eulerianos normalmente apresentam maior precisão no estudo de propagação e geração das ondas. No entanto, apresentam algumas limitações na estimação do galgamento, uma vez que necessitam de modelos adicionais para a modelação da superfície livre. Em situações de galgamento, onde existe uma grande deformação da superfície livre, o método Euleriano pode apresentar alguma imprecisão devido à difusão do método.

Os métodos Lagrangianos permitem identificar naturalmente a superfície livre mesmo em situações com grandes deformações da superfície livre. De entre os modelos numéricos Lagrangianos, destaca-se o método SPH. Atualmente o método SPH é amplamente utilizado no estudo da interação onda-estrutura e na quantificação do galgamento na sua versão 2D. Embora estes modelos sejam mais completos, ainda apresentam algumas limitações, essencialmente relacionadas com o tempo elevado de cálculo, a necessidade de calibração de alguns parâmetros para cada caso de estudo e a dificuldade na representação de certas características estruturais, tais como a porosidade (Neves et al., 2008). O método SPH tem sido utilizado, desenvolvido e validado no LNEC (Laboratório Nacional Engenharia Civil) desde 2007, com o objetivo de verificar a sua aplicabilidade no estudo da interação onda-estrutura. Este método tem sido muito utilizado no estudo de vários tipos de estruturas costeiras de geometrias e condições de agitação diferentes, tendo o modelo revelado capacidade de modelar fenómenos complexos, tais como a rebentação, o galgamento, a reflexão, a interação da onda incidente e refletida. A modelação do galgamento é especialmente difícil pois depende da correta modelação de todos os outros fenómenos que ocorrem neste tipo de escoamento. No entanto, tem-se obtido resultados precisos com o método SPH, em estudo da interação onda-estrutura (e.g., Didier e Neves, 2010), onde se verificou consistência e concordância nos resultados de caudal galgado obtidos no modelo SPH com os obtidos em modelo físico, com um erro relativo inferior à 3%.

## Capítulo 3

# Código DualSPHysics

### 3.1. Introdução

O DualSPHysics é um código numérico que baseia no método SPH para resolver as equações de dinâmica dos fluidos. Este código numérico é eficiente e fiável, com uma ampla gama de aplicações no campo de engenharia portuária, naval e costeira e no estudo de escoamentos com superfície livre.

DualSPHysics é um código aberto desenvolvido e disponibilizado sob os termos da GNU General Public License. Além do código-fonte, inclui uma documentação completa que facilita a compilação e a execução dos arquivos de origem. Atualmente, devido à capacidade dos processadores GPU (Graphics Processing Unit) ou CPU (Central Processing Unit), com poderosa capacidade de computação paralela, problemas de engenharia reais podem ser simulados com o DualSPHysics com alta resolução em um tempo razoável. A implementação desses processadores (GPU e CPU) possibilita executar o mesmo código, usando uma implementação de GPU ou CPU. Isto facilita e otimiza a utilização do código DualSPHysics. Na Figura 3.1 apresenta-se o fluxograma da implementação CPU e GPU e as diferentes etapas envolvidas em uma execução completa.

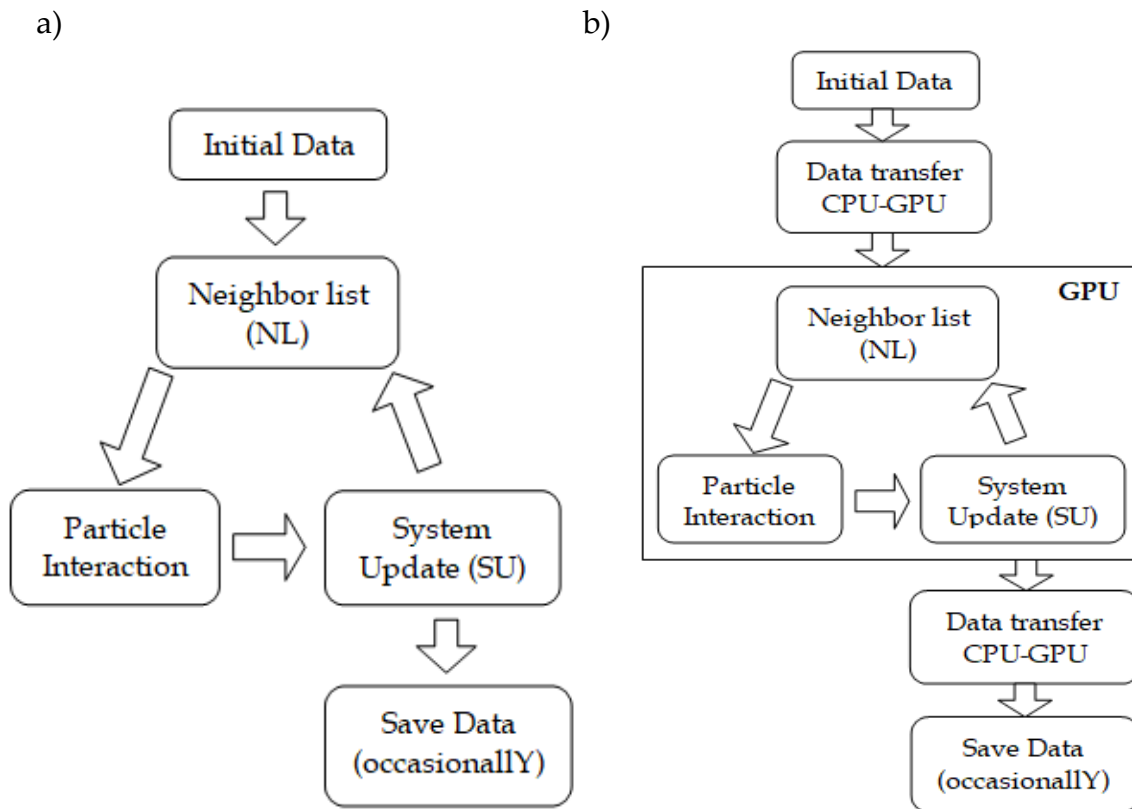


Figura 3.1 – Fluxograma da implementação: a) CPU, b) GPU adaptado de Crespo et al (2015).

No que se refere ao estudo da interação de ondas com estruturas, o DualSPHysics pode reproduzir com precisão a geração e propagação das ondas e as interações onda-estrutura e o galgamento (Didier e G. Neves, 2010b; Altomare, Zhang e Shang, 2018).

Nesta dissertação, utilizando a implementação de GPU o código DualSPHysics é aplicado ao estudo do galgamento de uma estrutura de proteção marginal situada entre dois esporões, pelo qual, neste capítulo, são apresentadas as principais características deste código no que se refere à sua aplicação ao caso de estudo em análise.

### 3.2. Método SPH

O SPH foi desenvolvido inicialmente para resolver problemas de astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977; Lucy, 1977) e mais tarde foi adaptado a problemas

de hidrodinâmica (Monaghan, 1994, 2005). Neste método o fluido é descrito como um conjunto de partículas.

O princípio fundamental do método SPH baseia-se em integrais de interpolação que consistem em funções,  $f$ , dadas por:

$$f(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)dr' \quad (3.1)$$

onde  $W$  é o kernel de interpolação,  $\mathbf{r}$  é o vetor posição,  $\mathbf{r}'$  é o vetor posição onde a função  $f$  é definida e  $h$  é a *Smoothing length* ou dimensão do suporte  $W$ , a qual limita a resolução do método.

A função  $f$  pode ser aproximada com base nos pontos discretos que estão dentro do domínio de influência do kernel (Figura 3.2). Neste caso, para uma partícula  $a$  a aproximação das partículas e dos integrais de interpolação é dado por um somatório:

$$f(\mathbf{r}_a) = \sum_b m_b \frac{f_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (3.2)$$

onde  $f_b$  é o valor da função  $f$  associado à partícula  $b$  localizada em  $\mathbf{r}_b$ ,  $W_{ab} = W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$  é o valor da função de interpolação na posição  $(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)$ ,  $m_b$  é a massa e  $\rho_b$  é a massa volúmica da partícula  $b$ , contido no domínio de influência de  $a$ .

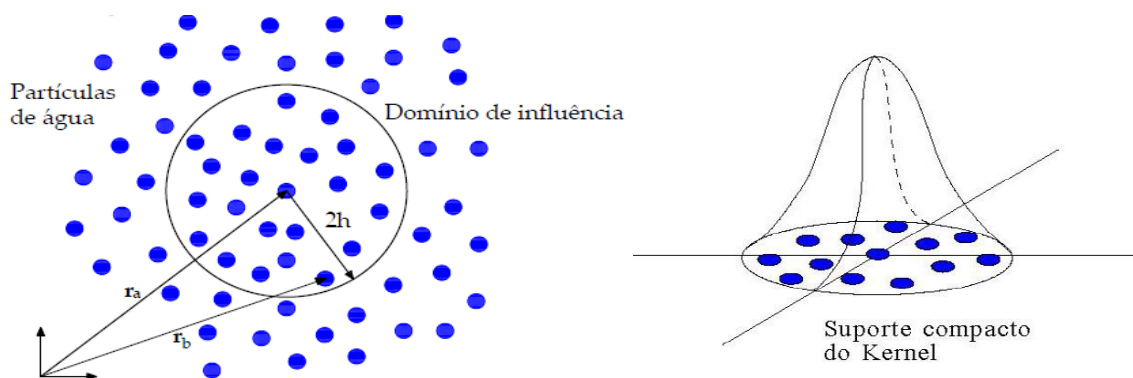


Figura 3.2 – Partículas do domínio de influência do kernel que contribuem para a interpolação e suporte compacto do kernel (Didier e Neves, 2010b).

### 3.3. Kernel de interpolação

O kernel de interpolação é uma função analítica que pode ser diferenciada sem necessitar de uma malha espacial e que varia com a distância (Didier e Neves, 2010). A sua implementação tem demonstrado que desempenha um importante papel nas aproximações realizadas no método SPH, sendo importante na eficiência computacional e na precisão do método SPH. Numericamente, o kernel é uma função com um suporte compacto dentro duma região determinada por um raio de  $2h$ , Figura 3.2. Esta dimensão deve ser muito inferior à escala típica do problema. No entanto, o parâmetro  $h$  deve ser superior à separação inicial das partículas. Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão do suporte do kernel e cada uma destas partículas tem uma contribuição no kernel.

O desempenho de um modelo SPH depende criticamente da escolha do kernel de interpolação, sendo que este deve verificar várias condições matemáticas (Liu, 2003).

O código DualSPHysics tem atualmente disponível dois tipos de kernels (Gesteira *et al.*, 2010): kernel Cubic Spline e kernel Quintic. Nesta dissertação utiliza-se o kernel Quintic, introduzido no formalismo SPH em 1996 por Morris, por apresentar uma melhor aproximação e uma maior estabilidade nos resultados.

Para 2D o kernel Quintic é dado por:

$$W(k, h) = \begin{cases} \frac{7}{4\pi h^2} \left(1 - \frac{k}{2}\right)^4 (2k + 1); & 0 \leq |k| \leq 2 \\ 0; & k > 2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Para 3D é dado por:

$$W(k, h) = \begin{cases} \frac{21}{16\pi h^3} \left(1 - \frac{k}{2}\right)^4 (2k + 1); & 0 \leq |k| \leq 2 \\ 0; & k > 2 \end{cases} \quad (3.4)$$

onde  $k = |(\vec{r}_a - \vec{r}_b)|/h$ .

### 3.4. Equação de conservação da massa e do balanço da quantidade de movimento

A equação de balanço da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \theta + g \quad (3.5)$$

em que  $\mathbf{v}$  é a velocidade,  $\rho$  é a massa volúmica,  $P$  a pressão,  $\theta$  é o termo viscoso e  $g$  é a aceleração da gravidade  $t$  é o tempo.

O termo viscoso pode ser tratado segundo três modelos diferentes: viscosidade artificial, viscosidade laminar e modelo de turbulência Sub-Particle Scale (Gesteira *et al.*, 2010). No entanto, atualmente o código DualSPHysics apresenta apenas duas opções: viscosidade artificial e modelo de turbulência Sub-Particle Scale. A viscosidade artificial é a considerada no presente estudo de modelação numérica desta dissertação. Foi proposta por Monaghan, (1992) e tem sido muito utilizada devido à sua simplicidade, embora se tenha verificado que este modelo introduz uma difusão numérica importante, alterando significativamente a altura das ondas (Didier e Neves, 2010).

No formalismo do método SPH, a equação discreta do balanço da quantidade de movimento pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (3.6)$$

onde  $\mathbf{v}_a$ ,  $P_a$  e  $\rho_a$  são respetivamente a velocidade a pressão e a massa volúmica de uma partícula  $a$ ,  $P_b$ ,  $\rho_b$  e  $m_b$  são respetivamente a pressão, a massa volúmica, e a massa de uma dada partícula  $b$  (contida no suporte compacto do kernel) e  $\Pi_{ab}$  é o termo de viscosidade artificial, dado por:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} -\frac{\alpha_i \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & \text{se } \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \text{se } \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} \geq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

com

$$\mu_{ab} = \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{\mathbf{r}_{ab}^2 + \eta^2} \quad (3.8)$$

em que  $\bar{c}_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$  e  $\bar{\rho}_{ab} = 0.5(\rho_a + \rho_b)$ , são respetivamente, a média de velocidade do som e da massa volúmica entre as partículas  $a$  e  $b$ ,  $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$  é a diferença de velocidades,  $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$  é a distância entre as partículas,  $\eta^2 = 0.01h^2$  e  $\alpha_i$  é um coeficiente que necessita ser ajustado para introduzir a dissipação apropriada. Um valor de  $\alpha_i = 0.01$  conduz a uma adequada propagação de onda (Altomare *et al.*, 2015).

No formalismo SPH cada partícula possui massa constante, o que permite, deste modo, calcular a massa volúmica do fluido através da equação de conservação de massa, que é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (3.9)$$

As partículas movem-se de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} \mathbf{v}_{ab} W_{ab} \quad (3.10)$$

onde  $\varepsilon = 0.5$ , valor usado no código SPHysics (Gesteira *et al.*, 2010).

A equação (3.10) incorpora a variante XSPH,  $\varepsilon$ , proposto por Monaghan (1994), que garante que as partículas se movem com uma velocidade próxima da média da velocidade de todas as partículas na sua vizinhança. O XSPH permite assegurar um fluxo mais ordenado e evitar a penetração entre os contínuos (Crespo *et al.*, 2015). No entanto, Didier e Neves (2009) mostrou que o valor de  $\varepsilon = 0.5$  usado no código SPHysics, apresenta uma instabilidade numérica ao

longo do tempo, o que não acontece quando a variante XSPH é anulada, ou seja, quando  $\varepsilon = 0$ .

O fluido, no formalismo SPH, é tratado como fracamente compressível (WCSPH). Isso facilita o uso de uma equação de estado para determinar a pressão no fluido através da equação como a equação de Tait (Crespo *et al.*, 2015), dada por:

$$P_a = G \left[ \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3.11)$$

onde o coeficiente  $G = c^2 \rho_0 / \gamma$ ,  $\gamma = 7$  é a constante politrópica,  $c = \sqrt{\partial P / \partial \rho} \big|_{\rho_0}$  é a velocidade do som e  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$  é a massa volúmica de referência da água.

### 3.5. Passo de tempo

Para cada variação no tempo, ou seja, para cada passo de tempo, as quantidades físicas, como por exemplo a velocidade, massa volúmica e posição, são atualizadas usando esquemas de integração temporal. No código DualSPHysics encontram-se atualmente implementados dois tipos de esquemas de integração temporal: algoritmo de Verlet (Verlet, 1967) e o algoritmo Symplectic (Leimkhuler, 1997).

Para a integração numérica, as equações de quantidade movimento (Equação (3.6)), de conservação de massa (Equação (3.9)) e a de variação de posição das partículas (Equação (3.10)), são escritas na seguinte forma, respetivamente:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \mathbf{F}_a \quad (3.12)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \quad (3.13)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \quad (3.14)$$

No presente trabalho foi utilizado a esquema de algoritmo Symplectic (Leimkhuler, 1997) para integração temporal. O Symplectic é um esquema explícito de segunda ordem com uma precisão no tempo de  $O(\Delta t^2)$  e envolve um método de previsão-correção (Altomare *et al.*, 2015).

Durante a fase de previsão os valores da massa volúmica e da posição são estimados num passo de tempo intermédio da seguinte forma:

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \quad (3.15)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{r}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^n \quad (3.16)$$

onde o sobrescrito  $n$  denota o passo de tempo e  $t = n\Delta t$ .

Durante a fase de correção a aceleração ( $d\mathbf{v}_a^{n+\frac{1}{2}}/dt$ ) é usada para calcular a velocidade corrigida e, portanto, a posição e velocidade das partículas no final do passo de tempo são dadas, respetivamente, por:

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^{n+1} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

Finalmente o valor corrigido da massa volúmica,  $d\rho_a^{n+1}/dt = D_a^{n+1}$ , é calculada usando o valor atualizado da velocidade ( $\mathbf{v}_a^{n+1}$ ) e da posição ( $\mathbf{r}_a^{n+1}$ ).

A utilização deste esquema de integração de tempo é depende da condição de Courant – Friedrich – Levy (CFL). Assim, um passo de tempo variável,  $\Delta t$ , é calculado (Monaghan, J, J; Kos, 1999) usando:

$$\Delta t = 0.3 \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (3.19)$$

sendo

$$\Delta t_f = \min\left(\sqrt{h/|\mathbf{f}_a|}\right) \quad (3.20)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \left( \frac{\sqrt{h/f_a}}{c_s + \max_b \left| \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{(\mathbf{r}_{ab}^2 + \eta^2)} \right|} \right) \quad (3.21)$$

onde  $\Delta t_f$  é o passo de tempo calculado a partir do vetor da força por unidade de massa,  $|\mathbf{f}_a|$ ,  $\Delta t_{cv}$  é o passo de tempo que controla a condição de CFL e  $c_s$  é uma constante que varia entre 0.1 e 0.3 (Brito, 2017; Brito, 2018; Canelas *et al.*, 2018.)

### 3.6. Condições de fronteiras

No DualSPHysic as fronteiras (estruturas costeiras, geradores de ondas (pistão), canal, etc.) são discretizadas por um conjunto de partículas de fronteira semelhantes às partículas do fluido e que podem ser fixas ou moveis.

A condição de fronteira dinâmica (*Dynamic Boundary Condition* – DBC) é a mais usada (Brito, 2017; Pereira, 2018). Nesta condição as partículas de fronteira satisfazem as mesmas equações que as partículas de fluido, porém elas não se movem de acordo com as forças exercidas sobre elas (Crespo *et al.*, 2007), permanecendo fixas na posição inicial ou movendo-se segundo um deslocamento externo, como é o caso do movimento do gerador de ondas.

A aproximação excessiva de uma partícula de fluido à fronteira resulta na diminuição da distância entre elas. Se essa distância for inferior a  $h$ , causa um aumento da massa volúmica das partículas e, conseqüentemente, um aumento da pressão que, por sua vez, devido ao termo de pressão na equação de conservação da massa e quantidade de movimento (Equação. (3.6)), exerce uma força repulsiva na partícula do fluido.



## Capítulo 4

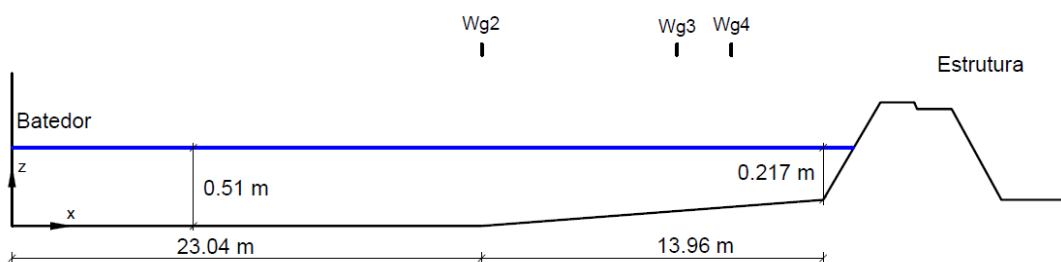
# Análise de sensibilidade e validação do modelo numérico

### 4.1. Análise de sensibilidade

Na aplicação de modelos numéricos é necessário inicialmente analisar a independência dos resultados dos valores de alguns parâmetros do modelo. Esta análise é o que se designa habitualmente por análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade efetuada e apresentada neste capítulo centra-se na análise da influência do valor do parâmetro  $d_p$ , ou seja, da distância inicial entre as partículas utilizada na modelação, que é um dos fatores mais importantes no método SPH e, como tal, na qualidade dos resultados do modelo. Assim, analisa-se aqui a influência da variação deste parâmetro nos resultados da elevação da superfície livre ao longo do canal.

Para isso, realiza-se o estudo numérico de um canal liso e impermeável com 49.4 m de comprimento, 1.6 m de largura e 1.2 m de altura, onde foi incorporada uma estrutura também lisa a 37 m da zona de geração da agitação, ou seja, de onde se encontra o batedor numérico.

O canal é constituído por uma zona horizontal com 23.04 m de comprimento seguida de uma rampa de 13.96 m com um declive de 2.1% até ao início da estrutura. É considerado um nível de água,  $d$ , constante de 0.51 m junto ao batedor, o que equivale a uma profundidade no pé da estrutura,  $d_s$ , de 0.217 m. São implementadas três sondas numéricas, Wg2, Wg3 e Wg4, tal como ilustra a Figura 4.1, que estão a uma distância de 23.04 m, 33.21 m e 34.37 m do batedor, respetivamente, e registam as variações da superfície livre,  $\eta$ , no tempo.



**Figura 4.1 - Representação do perfil longitudinal do canal e da posição das sondas usadas na análise de sensibilidade.**

O modelo numérico foi aplicado, na presente dissertação, utilizando como valores dos principais parâmetros numéricos os apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Parâmetros numéricos usados no estudo**

Descrição	Parâmetros
Algoritmo de discretização temporal	Symplectic
Kernel de interpolação	Quintic
Modelo para descrever os termos viscosos	Viscosidade artificial
Viscosidade de referência	1000 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade mínima válido	700 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade máximo válido	1300 Kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de velocidade do som	$c_s = 0.2$
Tempo de simulação	60 s
Passo de tempo para gerar os ficheiros de saída	0.02 s
Passo de tempo máximo da simulação	0.0001 s
Passo de tempo mínimo da simulação	0.00001 s

A análise de sensibilidade foi realizada para uma única condição de agitação, com os parâmetros de agitação que constam da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Condição de agitação utilizada na análise de sensibilidade

$H$	0.17 m
$T$	2.19 s
$d$	0.51 m
$d_s$	0.217 m

Este parâmetro,  $d_p$ , como anteriormente referido, é um dos fatores mais importantes no método SPH, pois dele depende fortemente a precisão dos resultados e o tempo de cálculo. A Tabela 4.3 mostra os valores de  $d_p$  utilizados nesta análise, variando entre uma discretização mais grosseira, para  $d_p = 0.06$  m, até uma mais refinada, para  $d_p = 0.004$  m. Também se apresenta o número das partículas, o *smoothing length*,  $h$ , o tempo de cálculo e os valores obtidos das alturas significativa,  $H_s$ , nas diferentes sondas numéricas.

Tabela 4.3 - Variação da distância inicial entre partículas.

$d_p$ (m)	Nº de partículas	$h$ (m)	Tempo de cálculo (min)	$H_s$ (m) de Wg2	$H_s$ (m) de Wg3	$H_s$ (m) de Wg4
0.06	4514	0.1247	9.52	0.077	0.039	0.037
0.05	6755	0.1039	9.88	0.089	0.051	0.062
0.04	10113	0.0831	12.72	0.094	0.052	0.085
0.03	19110	0.0624	21.31	0.117	0.085	0.115
0.02	43635	0.0416	38.87	0.108	0.105	0.144
0.015	75893	0.0312	55.88	0.110	0.119	0.151
0.01	170393	0.0208	151.2	0.113	0.148	0.179
0.009	210974	0.0187	199.22	0.115	0.150	0.185
0.007	342165	0.0145	364.12	0.117	0.141	0.173
0.006	470856	0.0125	550.03	0.115	0.155	0.183
0.005	670278	0.0104	913.07	0.120	0.144	0.175
0.004	1045256	0.0083	1698.63	0.122	0.145	0.175

Como se pode observar na Tabela 4.3, a diminuição do parâmetro  $d_p$  leva a um aumento do número de partículas, bem como do tempo de cálculo, ou seja, o esforço computacional é maior. Concretamente, para uma diminuição de  $d_p$  de aproximadamente 33%, que corresponde a quatro centésimas, caso verificado entre  $d_p = 0.06$  m e 0.02 m, há um aumento significativo do número de partículas, de 4514 para 43635, apresentando uma variação percentual aproximada de 867%.

A diminuição de  $d_p$  levou a que a onda alterasse o valor da sua altura e, em alguns casos, da sua forma. Nas Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam-se as séries temporais da superfície livre registadas nas sondas Wg2, Wg3 e Wg4, respetivamente, para os valores de  $d_p$  apresentadas na Tabela 4.3, onde se pode observar a variação do valor de  $H_s$  com o aumento de  $d_p$ .

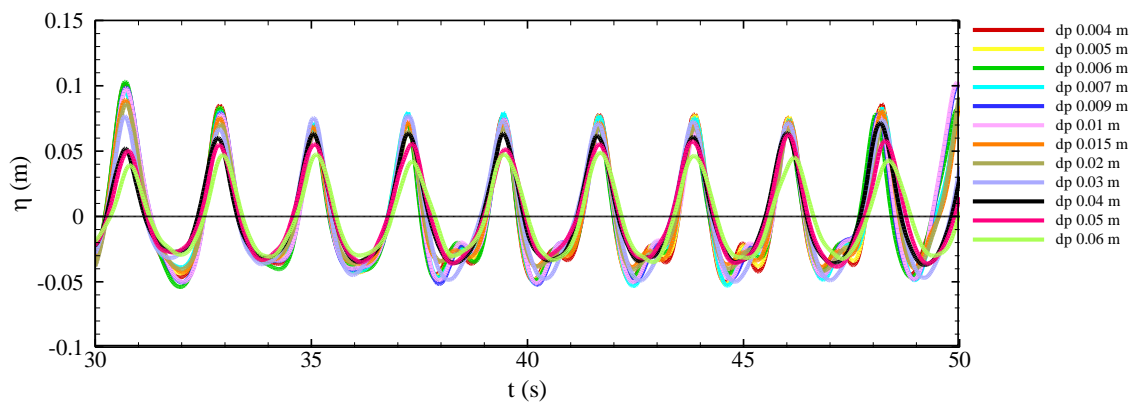


Figura 4.2 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2.

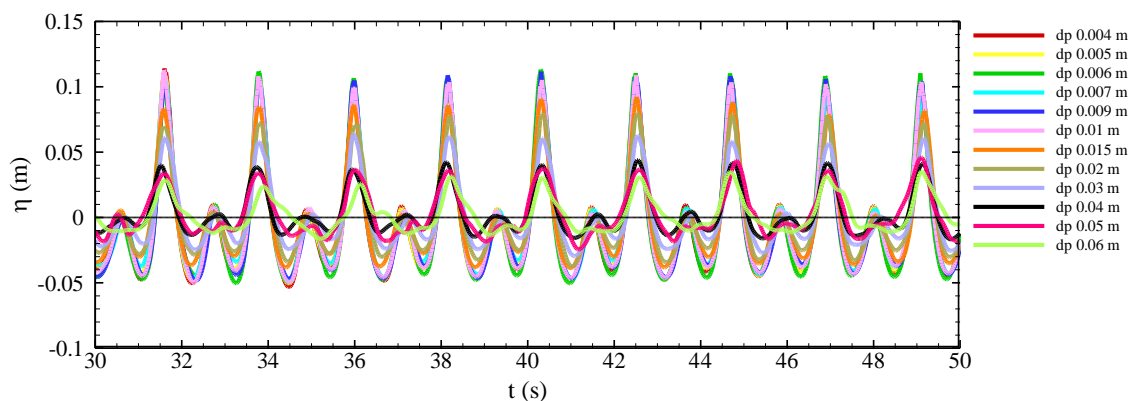


Figura 4.3 - Elevação de superfície livre na sonda Wg3.

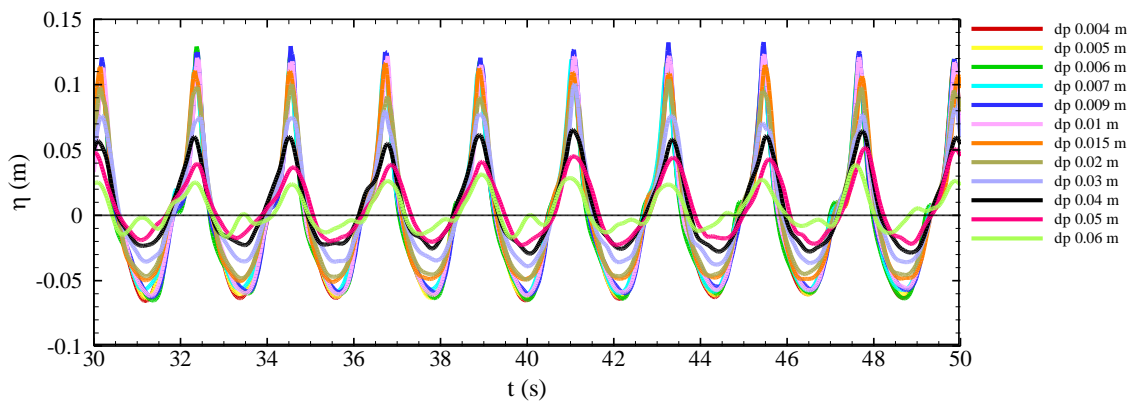


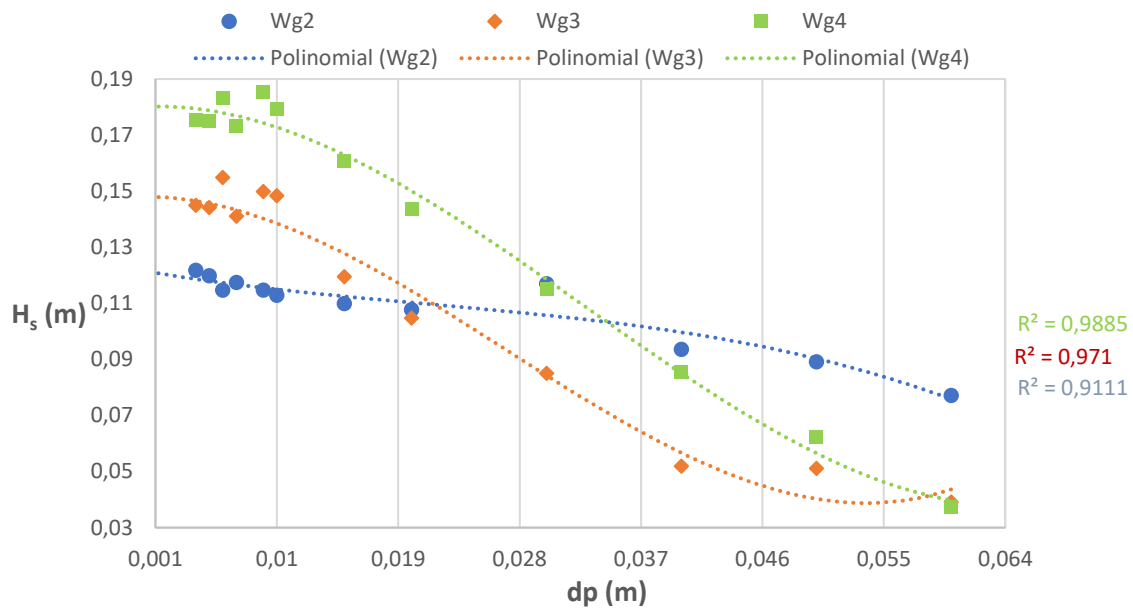
Figura 4.4 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4.

Na sonda Wg2, Figura 4.2, é menos notório a influência deste parâmetro na série temporal da agitação, com uma diferença máxima de  $H_s$  entre a discretização mais grosseira e a mais fina de 37%. No entanto, com a propagação e transformação da onda ao longo da rampa, Figura 4.3 e Figura 4.4, já se verifica essa influência, isto é, verifica-se que de  $d_p = 0.06$  m até 0.015 m as diferenças de  $H_s$  relativas à discretização mais fina varia entre 73% e 20% para sonda Wg3 e 78% e 14% para sonda Wg4 não se verificam a influência de harmônicas no sinal, porém elas existem para  $d_p = 0.01$  m até 0.004 m e as diferenças de  $H_s$  relativas à discretização mais fina reduzem-se para valores inferiores a 6%.

Na Figura 4.5 apresenta-se a relação entre a altura significativa,  $H_s$ , nas diversas sondas e a distância inicial das partículas,  $d_p$ , juntamente com a curva polinomial de melhor ajuste aos dados e o respectivo valor do coeficiente de correlação,  $R^2$ .

Da análise da Figura 4.5 é possível verificar que o aumento de  $d_p$  tem pouca influência na altura de onda significativa na sonda Wg2, sonda mais próxima do batedor e a maior profundidade, apresentando uma linha de tendência com uma inclinação suave, isto é, o valor de  $H_s$  reduz-se ligeiramente com o aumento de  $d_p$ . O mesmo não se verifica para as sondas Wg3 e Wg4, localizadas a menor profundidade, onde se observa que a linha de tendência de  $H_s$  com o aumento de  $d_p$  é mais acentuada até  $d_p = 0.01$  m, suavizando-se a

partir deste valor para  $d_p$  correspondente a discretização mais refinadas, embora se verifique também uma redução de  $H_s$  com o aumento de  $d_p$ .



**Figura 4.5 - Altura significativa nas sondas para as variações da densidade inicial de partícula.**

Com base na análise anterior, parece adequado para o estudo utilizar  $d_p = 0.01$  m, visto que simula bem a propagação das ondas, já que se verifica pouca variação deste valor para valores menores que este  $d_p$ . O mesmo pode ser verificado na Figura 4.6, onde se apresenta, para tempo de simulação de 37 s, o campo de velocidade na proximidade da estrutura para  $d_p = 0.05$  m,  $d_p = 0.03$  m e  $d_p = 0.01$  m.

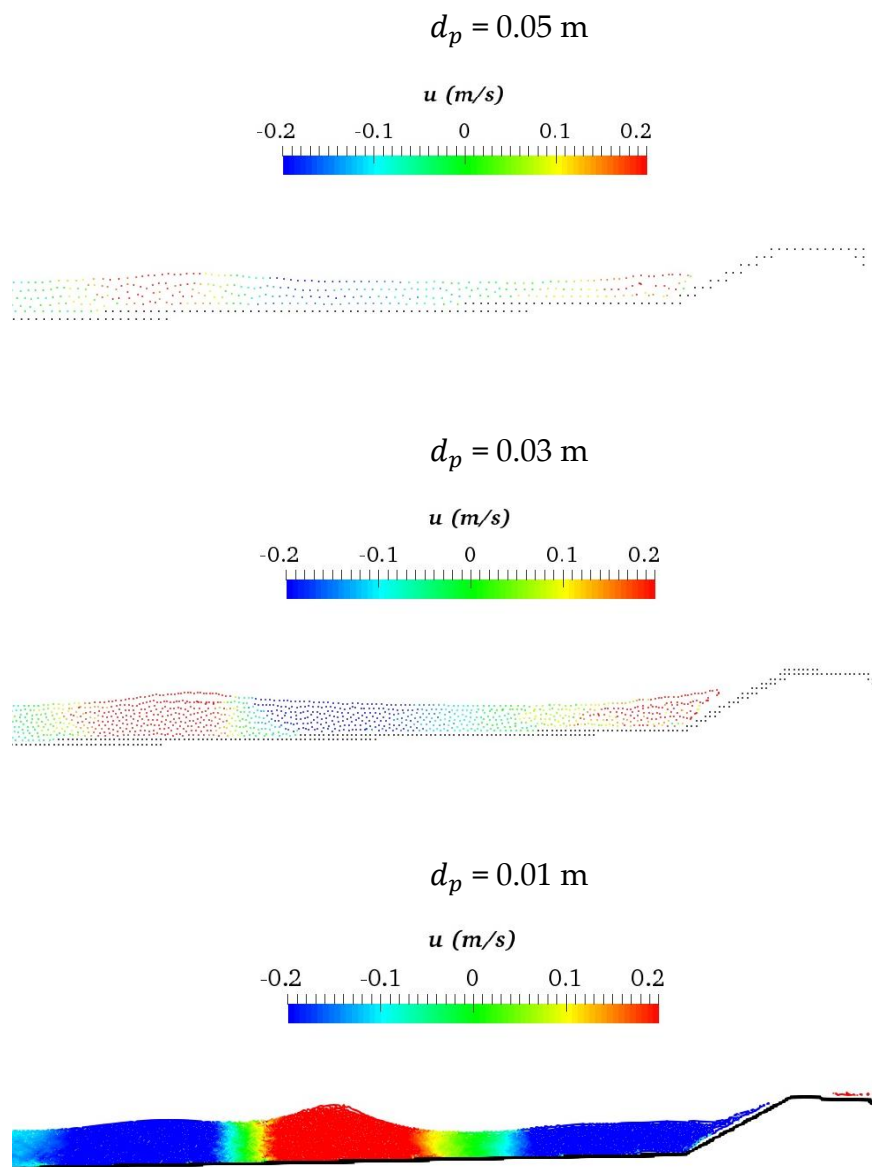


Figura 4.6 - Campo de velocidade na proximidade da estrutura para tempo de simulação de 37 s e para  $d_p = 0.05 \text{ m}$ ,  $d_p = 0.03 \text{ m}$  e  $d_p = 0.01 \text{ m}$ .

O valor de  $d_p = 0.01 \text{ m}$  pode, no entanto, não ser suficiente para o estudo de galgamento, visto que o galgamento é muito sensível à distância inicial de partículas. Didier e Neves (2010a) recomenda uma discretização mais fina para o galgamento, normalmente inferior ao valor que se obtém para a superfície livre, ou seja,  $d_p$  mais refinada de modo a se obterem resultados de galgamento independentes da distância inicial das partículas e com o mínimo tempo de

cálculo possível. Neste contexto, optou-se por um  $d_p = 0.005$  m para os estudos que se seguem de validação numérica.

## **4.2. Validação do modelo numérico**

### **4.2.1. Descrição dos casos de estudo**

Qualquer estrutura costeira pode, por si só, influenciar drasticamente a elevação da superfície livre na sua proximidade. Estas estruturas, ao interagir com a onda, podem dissipar mais ou menos energia e/ou ser mais ou menos refletoras. Por exemplo, uma superfície lisa dissipa menos energia que uma superfície rugosa, por sua vez esta última é menos refletora que a primeira. O galgamento varia na razão inversa da dissipação de energia, ou seja, quanto maior a dissipação, menor é o galgamento. No caso da reflexão, esta influencia simultaneamente a elevação da superfície livre e o galgamento, dependendo da amplitude e da fase das ondas refletidas. Assim, é importante simular corretamente as características da estrutura de forma a poder reproduzir corretamente os fenómenos que ocorrem na interação das ondas com a estrutura.

Com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade do método SPH em modelar deformações complexas da superfície livre e modelar a interação onda-estrutura no caso de estruturas porosas apresenta-se, nesta secção, a modelação numérica 2D utilizando o método SPH, para a geometria apresentada em 4.1 e para as condições de agitação ensaiadas em modelo físico, comparando-se os resultados obtidos com os dos ensaios experimentais (Viegas, 2014).

Os dados experimentais utilizados nesta dissertação foram obtidos nos ensaios realizados num canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em que o modelo experimental foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:30. Assim, a geometria do canal é a apresentada em 4.1 e a estrutura utilizada nos ensaios, Figura 4.7, tem uma secção do perfil transversal representativa do

quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira ver (Viegas, 2014). Para que o modelo reproduzisse as características do perfil que se pretendia representar, foi utilizado enrocamento de diferente granulometria, sendo o de menor granulometria utilizado no núcleo, o de granulometria intermédia utilizado nos filtros e a de maior granulometria utilizando no manto resistente. O manto apresenta uma determinada porosidade e rugosidade devido ao efeito do enrocamento utilizado, também representativo do manto do quebra-mar em questão.



Figura 4.7 - Perfil transversal da estrutura experimental (Viegas, 2014).

Realizaram-se vários casos de modelação numérica aplicando o método SPH para o mesmo canal que se reproduziu em modelo físico, mas variando o tipo de estrutura, de forma a aproximar o caso aqui estudado ao dos ensaios experimentais no que se refere à porosidade e rugosidade do manto, de forma a simular o melhor possível a interação da onda com a estrutura. Simularam-se, tal como mostra a Figura 4.8, as estruturas que se denominaram de: a) estrutura lisa (EL), b) estrutura rugosa (ER), c) e d) estruturas porosas (EP1 e EP2) e e) estrutura rugosa-porosa (ERP). As estruturas a) e b) diferem apenas na rugosidade da estrutura, não apresentando qualquer porosidade. As estruturas c) e d) são estruturas porosas que diferem quer na porosidade quer na rugosidade do manto, embora o efeito da porosidade seja o dominante. As estruturas d) e e) diferem essencialmente na rugosidade do manto.

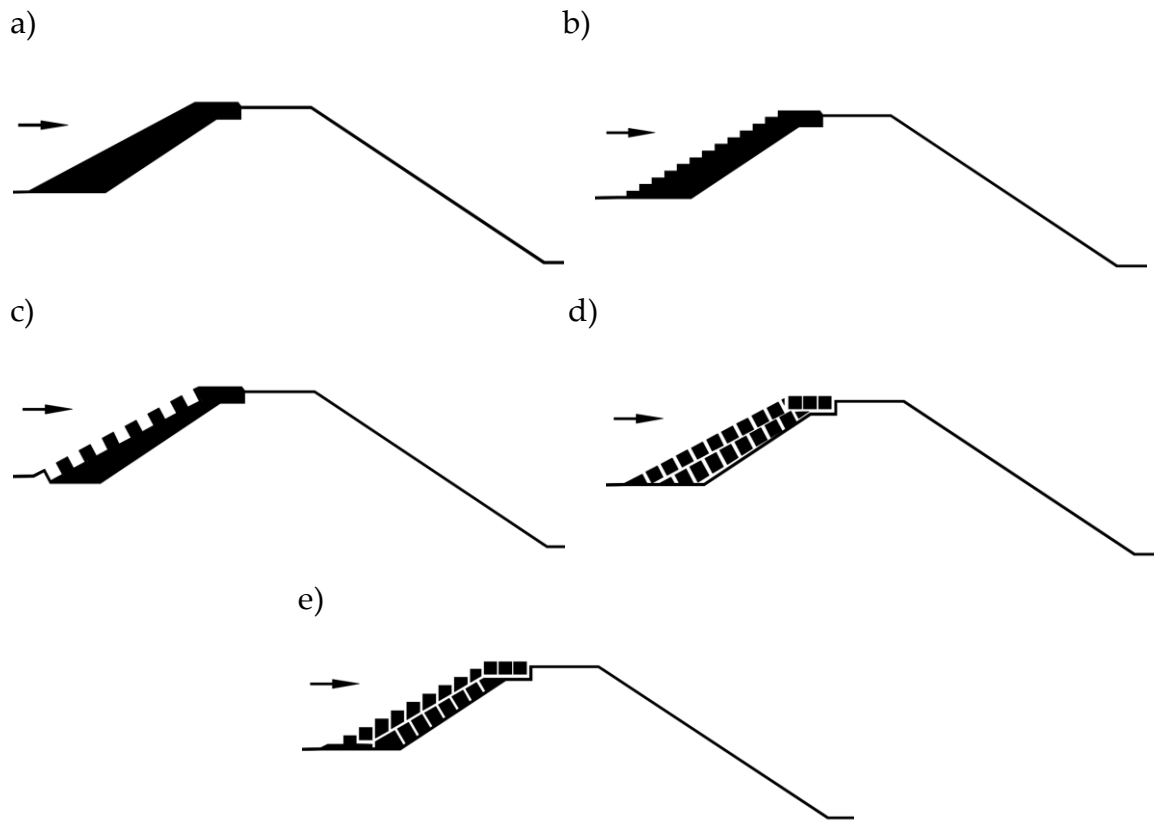


Figura 4.8 – Estrutura de superfície: a) lisa; b) rugosa; c) porosa (1); d) porosa (2); e) rugosa-porosa.

Ao longo do canal foram implementadas 7 sondas numéricas, a uma distância do batedor equivalente à usada nos ensaios (Figura 4.9).

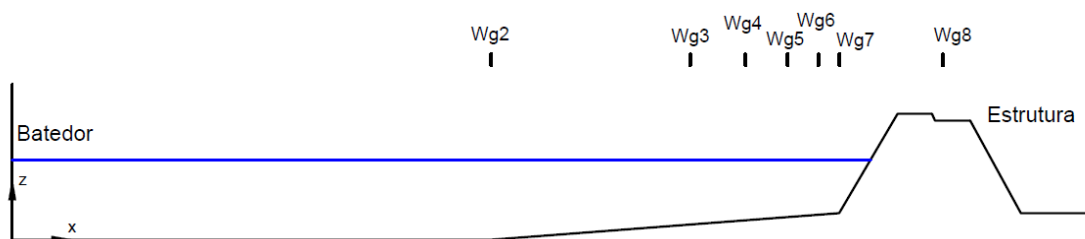


Figura 4.9 - Representação esquemático do perfil longitudinal com posicionamento das sondas.

As sondas numéricas Wg2 a Wg7 mediam a elevação da superfície livre no canal e a sonda numérica Wg8 registava a elevação do nível no tanque de recolha do volume de água que galga a estrutura, ou seja, o galgamento. A

tabela seguinte mostra as posições das sondas ao longo do canal, tendo o batedor como a referência.

**Tabela 4.4 - Posicionamento das sondas ao longo do canal e estrutura.**

Sondas	Wg2	Wg3	Wg4	Wg5	Wg6	Wg7	Wg8
Posição x (m)	23.04	33.21	34.47	34.96	35.77	36.94	37.87

As condições de agitação utilizadas nas simulações numéricas são as apresentadas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Condições de agitação utilizadas na validação numérica.**

<b><i>H</i> (m)</b>	<b><i>T</i> (s)</b>
0.13	2.19
0.17	

#### **4.2.2. Análise dos resultados**

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos na modelação numérica e comparam-se com os resultados da superfície livre em pontos ao longo do canal e do caudal médio de galgamento obtidos nos ensaios experimentais.

Na análise de resultados apresentam-se, para a elevação de superfície livre, os resultados para as estruturas em que ocorreu galgamento. Não ocorreu galgamento para condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m na estrutura porosa (1), estrutura rugosa e estrutura rugosa-porosa (Tabela 4.8). Assim, apresentam-se, a seguir, as séries temporais para:

- a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m para as estruturas apresentadas na Figura 4.8 a) e d), isto é, estrutura lisa e com blocos individuais dispostos paralelamente ao declive, designada por porosa (2).

- a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m para todas as estruturas apresentadas na Figura 4.8.

#### 4.2.2.1 Resultado para $T = 2.19$ s e $H = 0.13$ m

Nas Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam-se as series temporais nas sondas Wg2 e Wg4, obtidas nos ensaios experimentais para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m e obtidas com o modelo SPH para o caso da estrutura lisa apresentado na Figura 4.8 a). Nos ensaios obteve-se uma altura significativa de 0.077 m e 0.130 m nas sondas Wg2 e Wg4, respetivamente e no modelo obteve-se uma altura significativa de 0.088 m e 0.134 m.

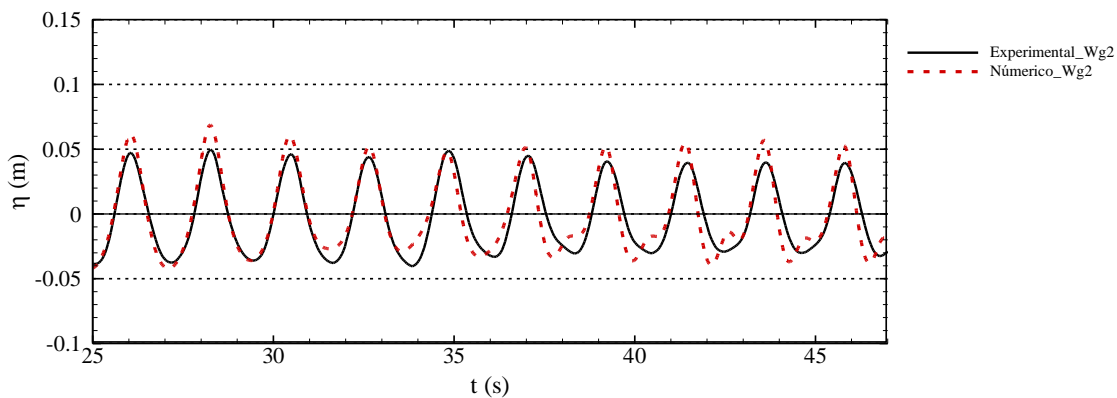


Figura 4.10 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa.

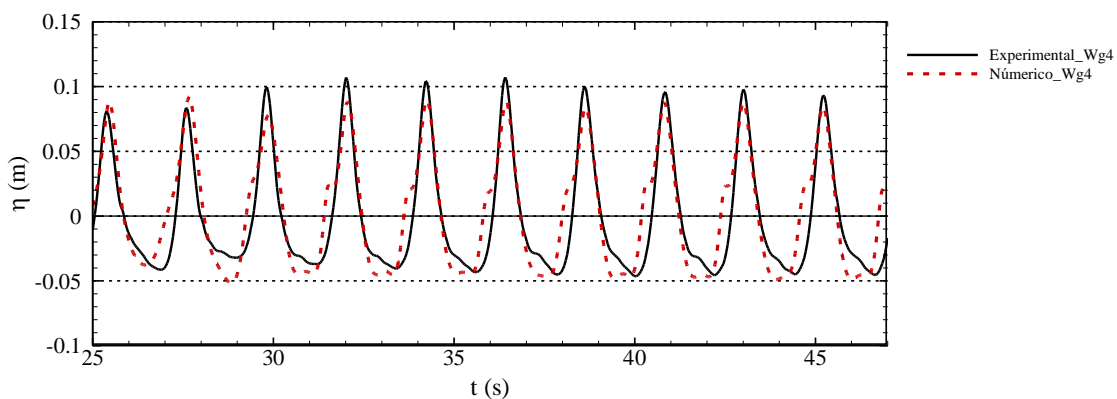
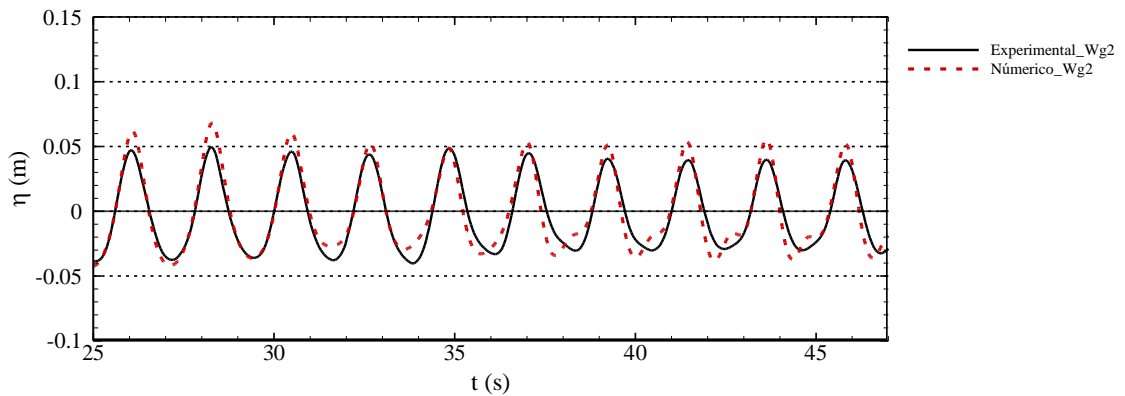
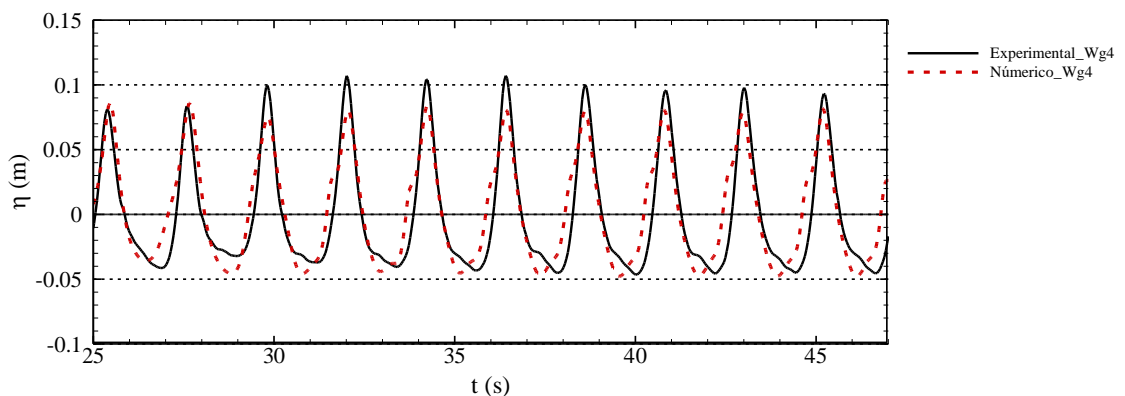


Figura 4.11 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa.

Nas Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam-se as mesmas séries temporais obtidas nas sondas Wg2 e Wg4 nos ensaios experimentais, mas agora comparadas com as obtidas com o modelo SPH para o caso da estrutura porosa (2) apresentado na Figura 4.8 d). Nos ensaios obteve-se uma altura significativa de 0.077 m e 0.130 m nas sondas Wg2 e Wg4, respetivamente, e com o modelo obteve-se uma altura significativa de 0.087 m e 0.127 m, respetivamente.



**Figura 4.12 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2).**



**Figura 4.13 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2).**

#### 4.2.2.2 Resultado para $T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m

Para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m foram simuladas as cinco geometrias apresentadas na Figura 4.8. Para todas elas são aqui apresentadas as séries temporais obtidas nas sondas Wg2 e Wg4 nos ensaios experimentais e as

séries temporais obtidas com o modelo SPH para cada uma das geometrias estudadas. As alturas significativas obtidas nos ensaios e no modelo SPH nas respectivas sondas Wg2 e Wg4 são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Altura significativa obtida no Modelo SPH e no ensaio experimental

	Modelo SPH		Ensaio experimental	
	$H_s$		$H_s$	
	Sonda Wg2	Sonda Wg4	Sonda Wg2	Sonda Wg4
<b>EL (a)</b>	0.1244	0.1748	0.120	0.1543
<b>EP1 (c)</b>	0.1199	0.1806		
<b>EP2 (d)</b>	0.1215	0.1763		
<b>ER (b)</b>	0.1208	0.1809		
<b>ERP (e)</b>	0.1193	0.1805		

Assim, apresenta-se a comparação das series temporais obtidas nas sondas Wg2 e Wg4 nos ensaios experimentais e com o modelo SPH com:

- Estrutura lisa (Figura 4.8 a), Figura 4.14 e Figura 4.15.
- Estrutura rugosa (Figura 4.8 b), Figura 4.16 e Figura 4.17.
- Estrutura porosa (1) (Figura 4.8 c), Figura 4.18 e Figura 4.19.
- Estrutura porosa (2) (Figura 4.8 d), Figura 4.20 e Figura 4.21.
- Estrutura rugosa-porosa (Figura 4.8 d), Figura 4.22 e Figura 4.23.

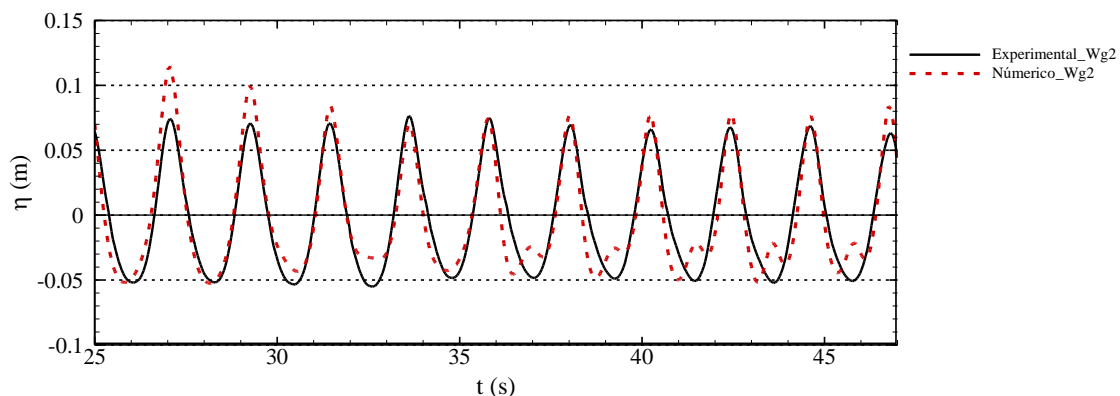
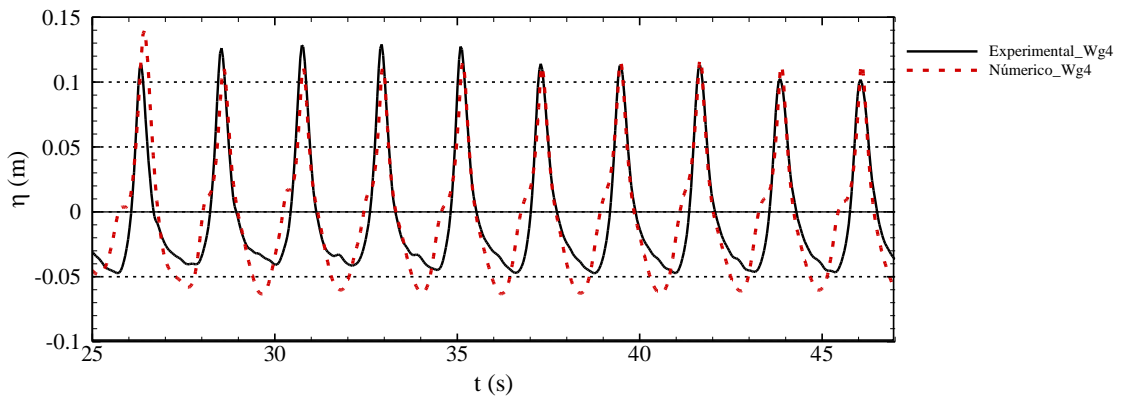
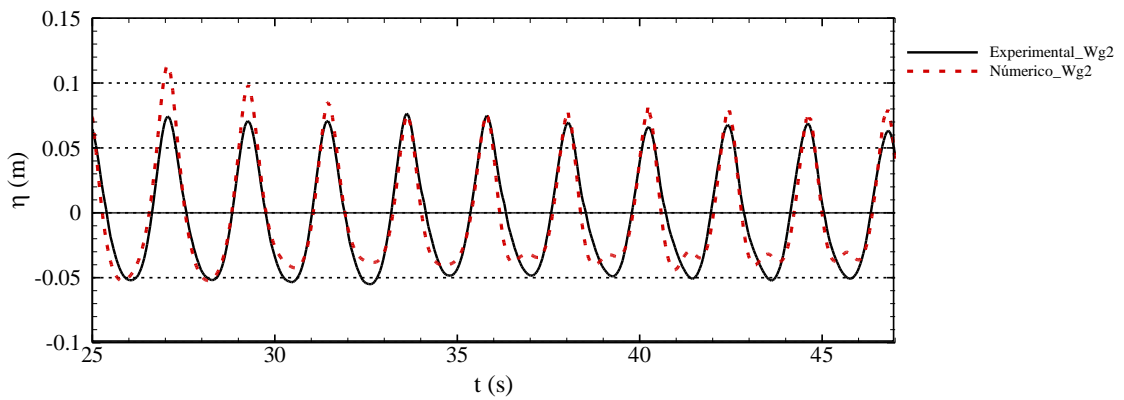


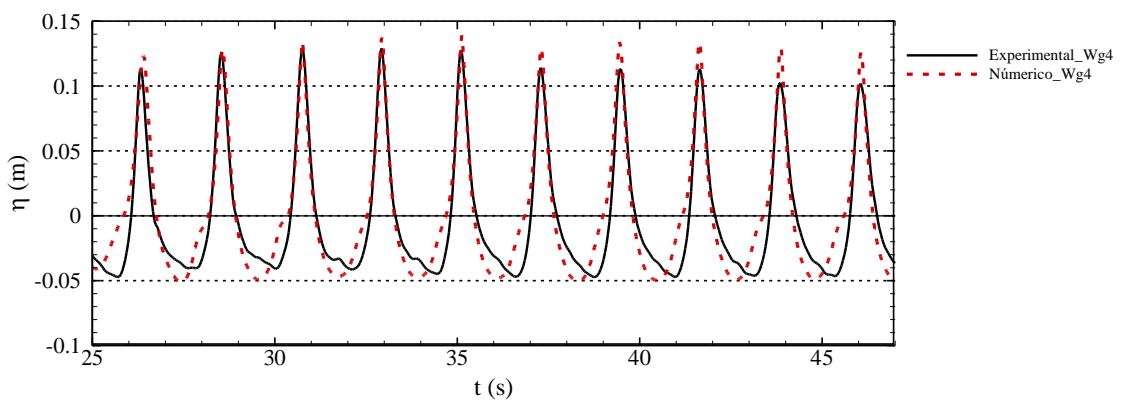
Figura 4.14 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa.



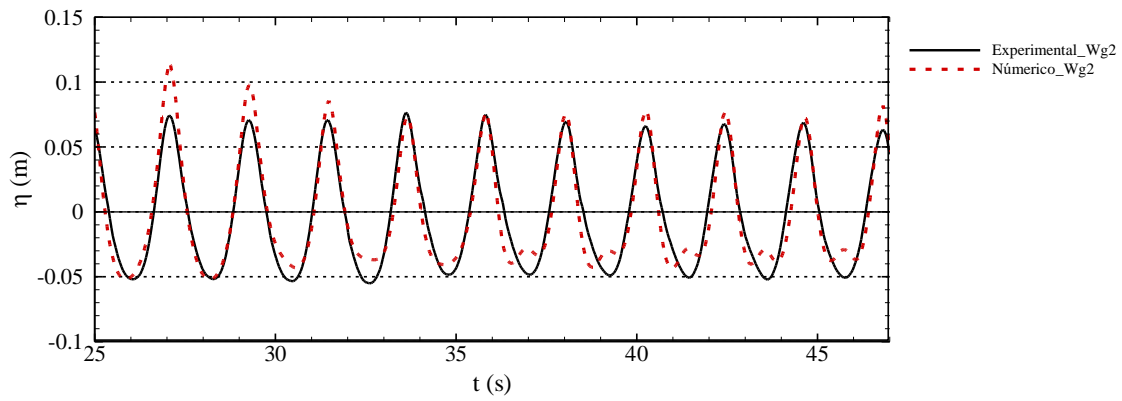
**Figura 4.15 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura lisa.**



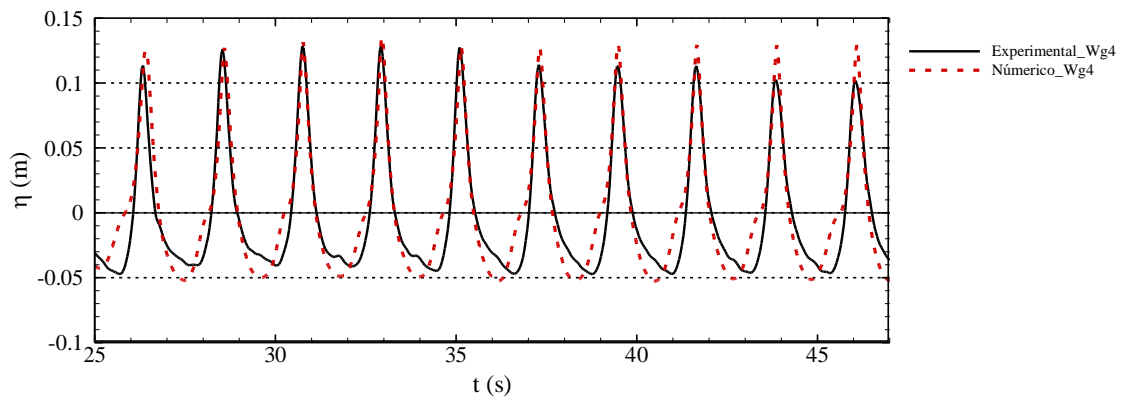
**Figura 4.16 - Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa.**



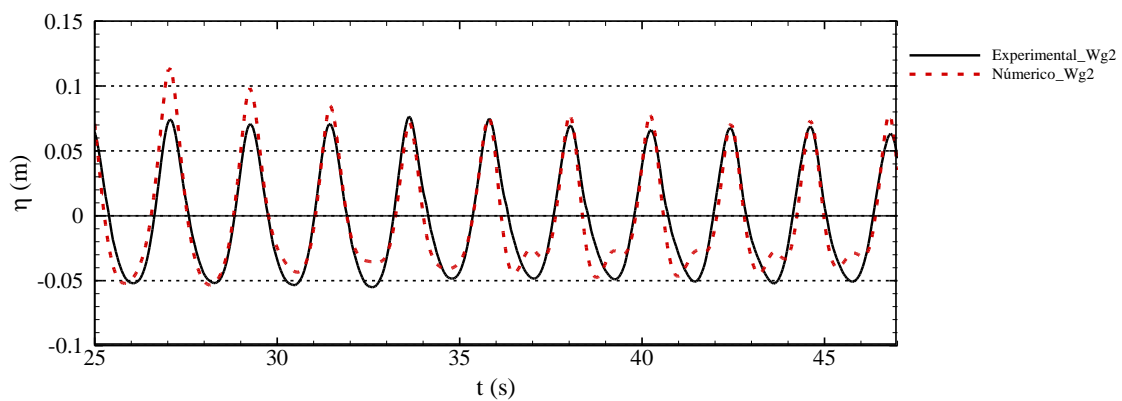
**Figura 4.17 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa.**



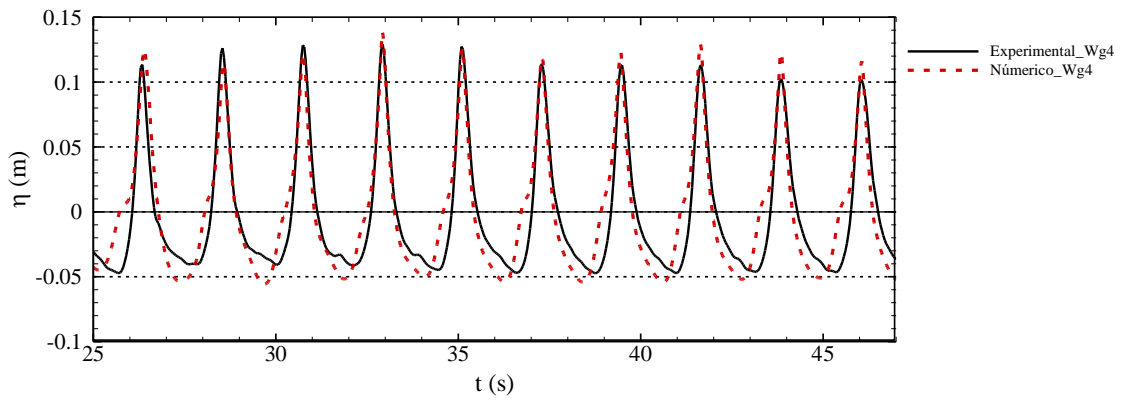
**Figura 4.18- Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (1).**



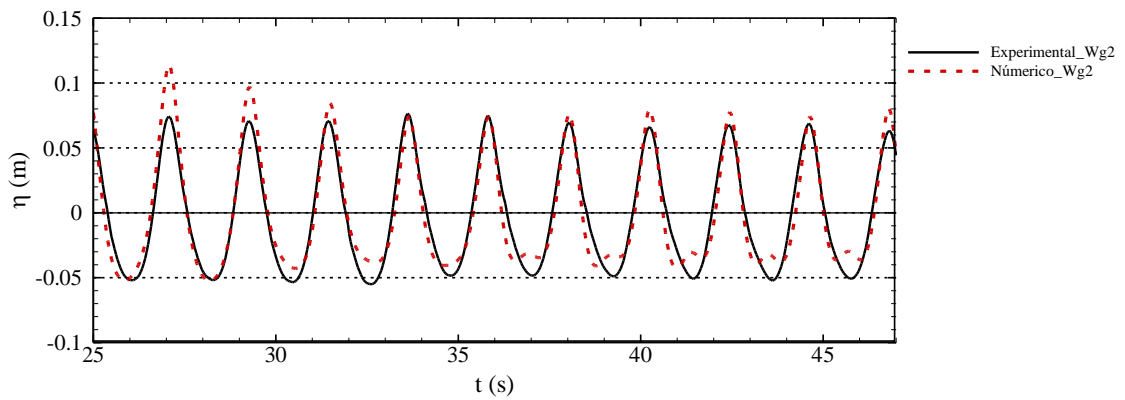
**Figura 4.19 - Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (1).**



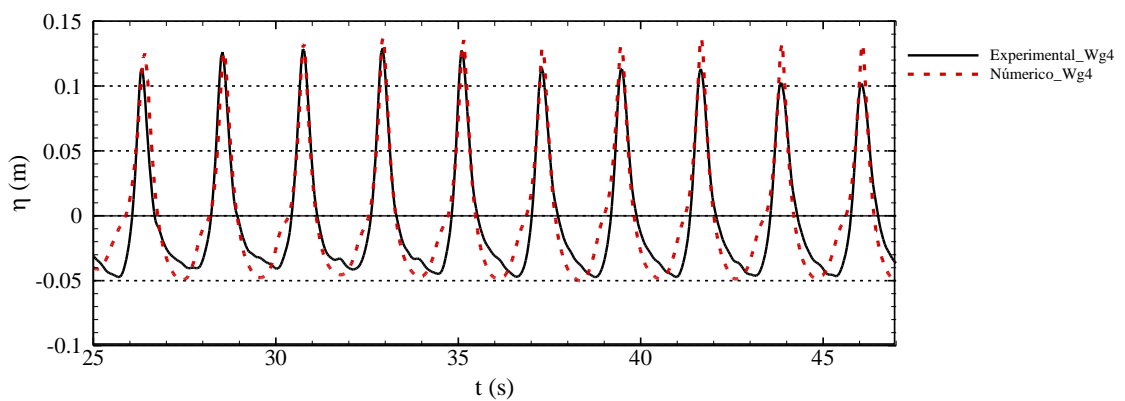
**Figura 4.20- Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2).**



**Figura 4.21-** Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura porosa (2).



**Figura 4.22-** Elevação de superfície livre na sonda Wg2 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa-porosa.



**Figura 4.23-** Elevação de superfície livre na sonda Wg4 obtida nos ensaios e com modelo SPH considerando o caso de estrutura rugosa-porosa.

### 4.2.2.3 Análise dos resultados

Analisando as séries temporais apresentadas, Figura 4.10 a Figura 4.23, na sonda Wg2 verifica-se a existência de uma pequena diferença entre as elevações da superfície livre obtidas nos ensaios experimentais e as obtidas com o modelo para os diferentes tipos de estruturas simuladas. Embora as séries temporais apresentem uma boa concordância entre si, com sobreposições harmônicas dos sinais, é visível a diferença de alturas nas cristas e nas cavas das ondas. Relativamente às elevações da superfície livre registadas na sonda Wg4, estas também apresentam uma boa concordância com os dados experimentais. No entanto, para além de apresentarem diferenças nas alturas das cristas e das cavas, apresentam um ligeiro desfasamento no tempo, que se deve à reflexão da onda na estrutura, uma vez que esta sonda se localiza próxima da estrutura. Os resultados obtidos parecem indicar que as estruturas simuladas nesta dissertação são mais refletoras que a estrutura experimental.

Para quantificar as diferenças obtidas entre o modelo físico e numérico, na Tabela 4.7 apresentam-se os cálculos de  $A_X$  (Equação (4.1)) e  $\varphi_X$  (Equação (4.2)) (Crespo *et al.*, 2017).  $A_X$ , relaciona as séries temporais da superfície livre numéricas e experimentais e  $\varphi_X$ , estima a diferença relativa da fase entre os resultados numérico e experimental. Valores de  $A_X = 1$  e  $\varphi_X = 0$  ocorrem quando as séries temporais são iguais.

$$A_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{num})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^{exp})^2}} \quad (4.1)$$

$$\varphi_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{num} - X_i^{exp})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^{exp})^2}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.7 – Cálculo das diferenças entre as séries temporais numéricas e experimentais.

	$T = 2.19 \text{ s}; H = 0.13 \text{ m}$				$T = 2.19 \text{ s}; H = 0.17 \text{ m}$			
	Sonda Wg2		Sonda Wg4		Sonda Wg2		Sonda Wg4	
	$A_x$	$\varphi_x$	$A_x$	$\varphi_x$	$A_x$	$\varphi_x$	$A_x$	$\varphi_x$
<b>EL</b>	1,1395	0,4996	0,9515	0,5581	1,0754	0,5245	0,9989	0,5649
<b>EP (1)</b>	1,1406	0,4423	0,8842	0,4622	1,0711	0,4990	1,0008	0,5213
<b>EP (2)</b>	1,1407	0,4758	0,8906	0,5011	1,0714	0,4537	0,9907	0,5607
<b>ER</b>	1,1440	0,4623	0,8822	0,4799	1,0766	0,490	1,0060	0,5334
<b>ERP</b>	1,1451	0,4597	0,8788	0,4758	1,0739	0,4848	1,0061	0,5388

Analisando os resultados apresentados na tabela verifica-se que a estrutura que leva a resultados que mais se aproximam dos resultados dos ensaios experimentais a nível de superfície livre é a estrutura porosa (1), pois apresenta menor valor da diferença entre as séries temporais numéricas e experimentais. Constata-se ainda que, para a estrutura lisa, independentemente das condições de agitação e das sondas em análise, os valores de  $\varphi_x$  são sempre superiores aos das outras estruturas, apresentando uma diferença de fase maior, o que se pode dever a que esta é a estrutura mais refletora simulada e que difere na rugosidade e na porosidade da estrutura ensaiada experimentalmente, o que necessariamente altera quer a reflexão quer a dissipação na estrutura.

Para cada simulação calculou-se o caudal médio galgado por metro linear de estrutura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8. O volume de água que galga a estrutura é o registado na sonda Wg8, entre 10 s e 47 s, isto é, excluindo o tempo em que se verifica a existência de re-reflexão das ondas no batedor, o que introduz alterações significativas das condições de agitação e, conseqüentemente, na intensidade do galgamento. Por fim o volume de água que galga a estrutura é multiplicando por 1000, para passar de  $\text{m}^3$  para l, e dividido pelo respetivo tempo, obtendo-se o caudal médio galgado em l/s/m.

Tabela 4.8 - Caudal médio galgado,  $Q$ , na diferente estrutura simuladas.

Condições de agitação		$Q$ (l/s/m) entre 10 a 47 segundos	
		$T = 2.19 \text{ s e } H = 0.13 \text{ m}$	$T = 2.19 \text{ s e } H = 0.17 \text{ m}$
Experimental		0.0364	1.03
Numérico	EL (a)	0.0372	2.851
	EP1 (c)	-	2.194
	EP2 (d)	0.0128	2.758
	ER (b)	-	1.3995
	ERP (e)	-	1.5528

Da Tabela 4.8 verifica-se que, para a condição de agitação  $T = 2.19 \text{ s e } H = 0.13 \text{ m}$ , o modelo com a estrutura porosa (1), estrutura rugosa e estrutura rugosa-porosa não apresenta galgamentos. Para a condição de agitação  $T = 2.19 \text{ s e } H = 0.17 \text{ m}$  ocorrem galgamentos para todas as estruturas simuladas. Relativamente aos valores de caudal médio galgado obtido com a modelação numérica, a estrutura que mais se aproxima da estrutura experimental é a estrutura rugosa, apresentando uma diferença de 26% com o  $Q$  dos ensaios. No entanto, não é galgada para condição de agitação  $T = 2.19 \text{ s e } H = 0.13 \text{ m}$ , ou seja, sobrestima o  $Q$  para esta condição de agitação. Para a estrutura lisa o valor do caudal médio obtido para a condição de agitação  $T = 2.19 \text{ s e } H = 0.13 \text{ m}$  é de 0.0372 l/s/m, 2,2% superior à obtida nos ensaios. No entanto, para condição de agitação  $T = 2.19 \text{ s e } H = 0.17 \text{ m}$ , o valor de caudal médio apresenta um valor 64% superior ao obtido nos ensaios.

## Capítulo 5

# Modelação numérica

### 5.1. Modelão numérica 2D

Esta secção apresenta e discute em mais detalhe os resultados da aplicação do modelo SPH bidimensional apresentados no capítulo anterior considerando as diferentes estruturas simuladas no capítulo 4 e as mesmas condições de agitação e centra-se na análise da influência da geometria da estrutura costeira:

- na elevação da superfície livre e
- no galgamento.

Como quer a elevação da superfície livre quer o galgamento variam com a variação da reflexão, inicialmente apresenta-se uma análise da influência da geometria da estrutura na reflexão, para uma melhor compreensão dos resultados.

Este tipo de análise da interação onda-estrutura, normalmente realizada através de estudos em modelo físico, é cada vez mais frequentemente complementada com a modelação numérica de um maior número de condições ou geometrias, tal como se realiza nesta dissertação.

#### 5.1.1. Análise de reflexão nas estruturas

A energia da onda incidente que interage com uma estrutura é, normalmente, traduzida pelo somatório da componente referente à transmissão, dissipação e reflexão. Relativamente ao fenómeno da reflexão, este verifica-se após a interação da onda com a estrutura, gerando uma onda que se propaga com o mesmo período e direção da onda incidente, mas em sentido oposto.

Nesta secção determina-se, para cada estrutura, o coeficiente de reflexão,  $K_r$ , igual à razão entre as alturas de onda refletida e incidente, obtido com as diferentes estruturas simuladas no capítulo 4. Para isso, utilizou-se o método

apresentado por Mansard e Funke (1980), que permite separar os espectros incidente e refletido com base em séries temporais das elevações da superfície livre obtidas em três sondas com distâncias entre elas que devem respeitar as seguintes relações:

- $X_{12} \cong L/10$
- $L/6 \leq X_{13} \leq L/3$
- $X_{12} \neq m X_{13}$

onde  $L$  é o comprimento de onda e  $X_{ij}$  é a distância entre a sonda  $i$  e a sonda  $j$ , Figura 5.1 e  $m$  é um número inteiro.

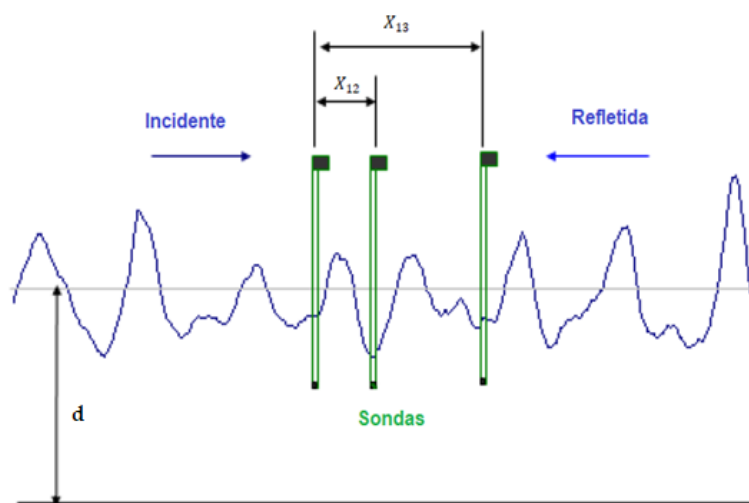


Figura 5.1 - Distância entre as sondas no método de separação de espectro incidente e refletida adaptado de (Mestre, 2015).

Após a obtenção dos espectros incidente e refletido através do método acima referido, o coeficiente de reflexão é calculado através da razão entre a energia do espectro refletido e o espectro incidente.

A tabela seguinte apresenta valores dos coeficientes de reflexão,  $K_r$ , para as diferentes estruturas simuladas, utilizando as condições de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m e para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m.

Tabela 5.1 - Coeficiente de reflexão para diferentes estruturas simuladas

	Coeficiente de reflexão $K_r$	
	$T = 2.19$ s e $H = 0.13$ m	$T = 2.19$ s e $H = 0.17$ m
EL	51.8%	48.8%
EP1	48.6%	47.0%
EP2	49.7%	47.7%
ER	47.4%	46.5%
ERP	46.7%	46.3%

Pelos resultados apresentados na tabela anterior, é visível uma ligeira diminuição de  $K_r$  com o aumento de  $H$ , como seria expectável.

Para as duas condições de agitação utilizadas na simulação, é visível que EL é a estrutura mais refletora de todas, como seria de esperar, já que é uma estrutura impermeável não rugosa. Verifica-se ainda que a combinação da porosidade com a rugosidade leva a que ERP seja estrutura menos refletora, apresentando um menor  $K_r$ . Comparando esta estrutura (ERP) com EP2, apesar de ambas serem porosas, a disposição geométrica dos blocos faz com que a primeira tenha uma maior rugosidade associada, tornando-se assim um fator diferenciador e que promove a diminuição da reflexão.

### 5.1.2. Análise de influência da geometria simulada na superfície livre

Para analisar a influência da geometria simulada nos resultados da agitação na proximidade da estrutura apresenta-se, na Figura 5.2 e Figura 5.3, as séries temporais da superfície livre para as diferentes estruturas simuladas (ver Figura 4.8), obtidas na sonda Wg2 e sonda Wg4 (ver Figura 4.1), respetivamente, sendo estas referentes à condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m. A Figura 5.4 e Figura 5.5 são referentes às séries temporais da superfície livre obtidas na sonda Wg2 e sonda Wg4 respetivamente, para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m.

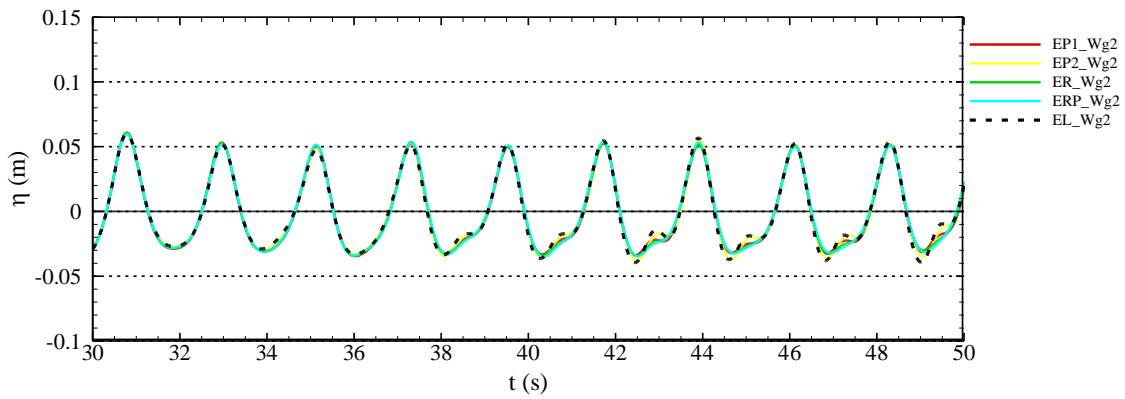


Figura 5.2 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg2 para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m.

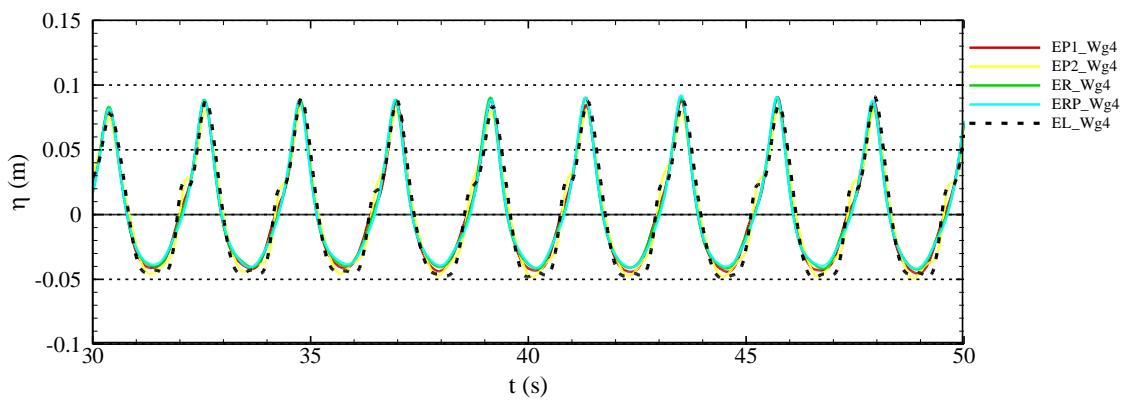


Figura 5.3 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg4 para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m.

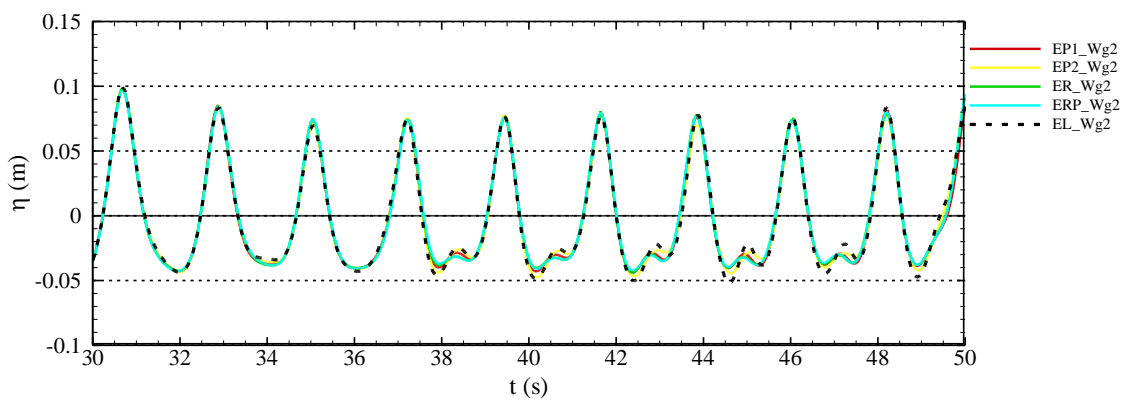
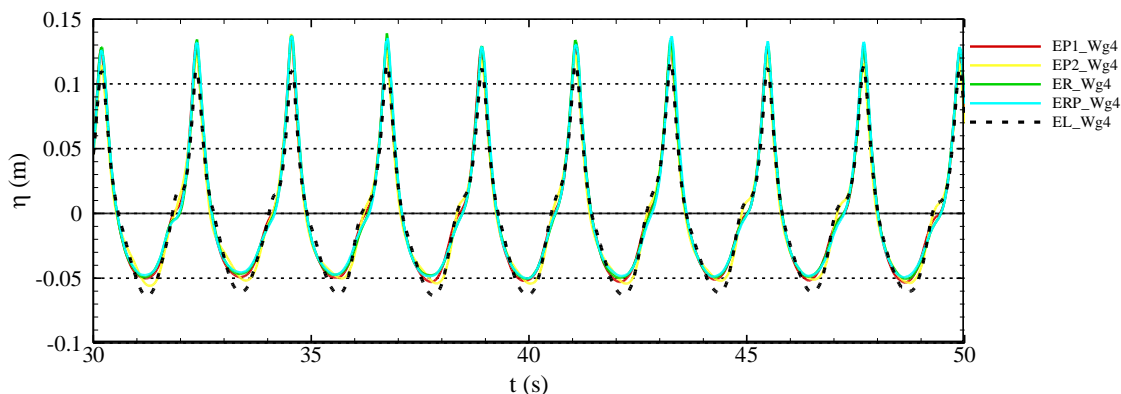


Figura 5.4 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg2 para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m.



**Figura 5.5 - Elevação de superfície livre das diferentes estruturas simuladas obtidas na sonda Wg4 para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m.**

Analisando a Figura 5.2, verifica-se que as séries temporais da elevação da superfície livre na sonda Wg2 apresentam uma variação pouco significativa entre elas. O mesmo sucede para as elevações de superfícies livres na sonda Wg4 (Figura 5.3). Essa variação é mais visível para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m, correspondente à Figura 5.2 e Figura 5.3 que para a segunda condição de agitação incidente testada, Figura 5.4 e Figura 5.5.

A reflexão na estrutura pode ser o principal fator que leva a que exista essa variação, ou seja, cada tipo de superfície (lisa, rugosa, porosa e rugosa-porosa) reflete de forma diferente as ondas, o que introduz diferenças na superfície livre em frente à estrutura.

É de referir que o tempo que uma sonda leva a registar a influência da onda refletida na superfície livre é função da sua posição em relação a estrutura simulada. Efetivamente, a reflexão acontece mais tarde na sonda Wg2 (Figura 5.2 e Figura 5.4), pois está mais longe da estrutura simulada, do que na sonda Wg4 (Figura 5.3 e Figura 5.5).

Relativamente à sonda Wg2 e para condição  $T = 2,19$  s e  $H = 0,13$  m pode verificar-se que, para as diferentes estruturas simuladas, as cristas das ondas não apresentam variações ao nível de deformações, mas sim ao nível de altura, sendo as diferenças de altura muito pouco significativas (inferiores a 1%). Em relação às cavas, é visível que a reflexão afeta as elevações da superfície livre a

partir do segundo 38, evidenciando as deformações desta, verificando-se pequenas diferenças nas alturas e desfasamentos em relação ao tempo, particularmente para EP2 e EL, com maior relevância na segunda.

A sonda Wg4, embora a sua posição em relação às estruturas simuladas seja mais próxima que a da sonda Wg2, apresenta cristas sem variações ao nível de deformações da superfície livre. O que se verifica é uma variação maior ao nível de altura de onda, mas também pouca significativa (inferior a 11%). Já nas cavas, a partir do segundo 26, verifica-se a presença do fenómeno da reflexão no sinal harmónico. Neste caso, a deformação é mais visível, bem como as diferenças das alturas e desfasamentos em relação ao tempo, particularmente para EP2 e EL, sendo também mais significativa na EL.

Para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m, a sonda Wg2 apresenta o mesmo comportamento que para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m, mas com a particularidade de ter uma maior amplitude tanto das cristas como das cavas, devido ao facto de a altura incidente ser maior.

Relativamente à sonda Wg4 para a mesma condição de agitação acima referida, esta também tem uma maior amplitude tanto das cristas como das cavas que para a condição  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m. No conjunto das superfícies livres obtidas na sonda Wg4 para as diferentes geometrias da estrutura (Figura 5.3 e Figura 5.5) é importante referir que a superfície livre da estrutura lisa (EL) apresenta uma crista menor e uma cava maior que as obtidas com as outras estruturas, mais significativa para  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m. Este facto pode ser uma consequência do aumento de  $H$  que faz com que a influência da reflexão na altura de onda em frente à estrutura, incidente mais refletida, seja menor.

### **5.1.3. Análise da influência da geometria no galgamento**

O fenómeno de galgamento, tal como referindo anteriormente, não ocorre em todas as estruturas simuladas para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m, portanto a análise que se segue é referente à condição de agitação  $T = 2.19$  s e

$H = 0.17$  m, para a qual se verifica galgamento em todas as estruturas simuladas.

A evolução do volume que galga a estrutura obtido ao longo do tempo pode ser observada na Figura 5.6.

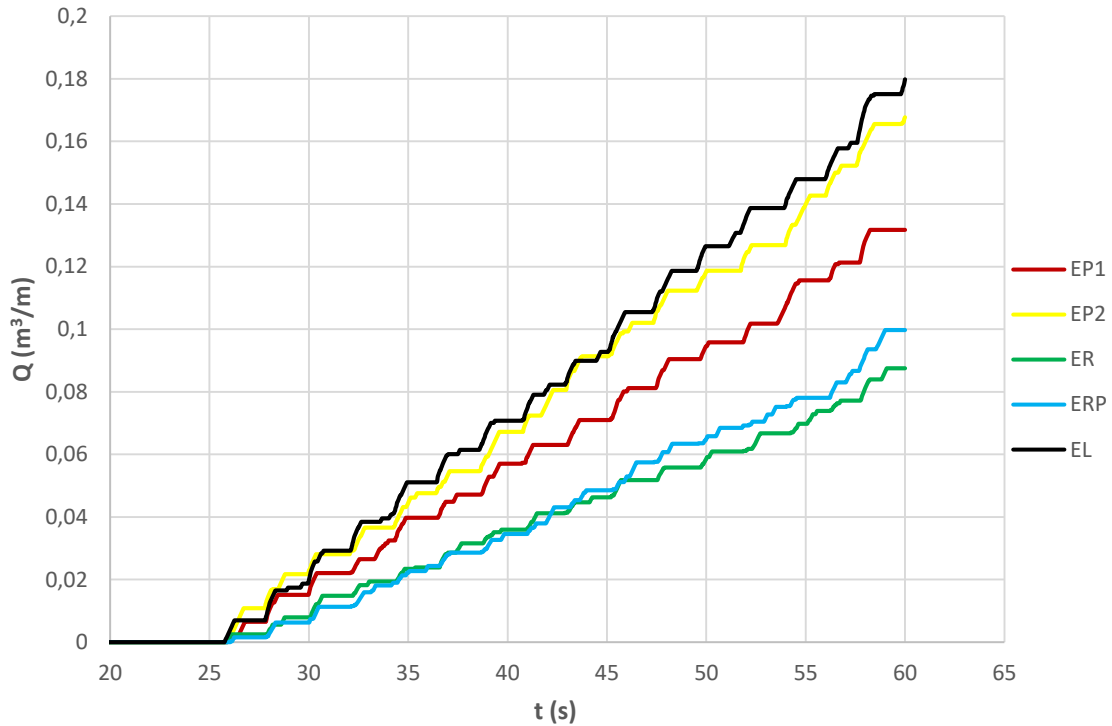


Figura 5.6 - Volume galgado ao longo do tempo para condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m.

Da Figura 5.6 nota-se que o registro do início do galgamento ocorre para mesmo tempo (segundo 26) em todas as estruturas simuladas, ou seja, antes de a influência da reflexão na altura de onda em frente à estrutura se fazer sentir. Analisando a evolução do galgamento entre o segundo 25 até ao segundo 45, conclui-se que a importância da dissipação da energia da onda pela estrutura é pouco relevante, já que há uma sobreposição significativa de valor de volume galgado quando se comparam os resultados para as estruturas EP2 com EL e da ER com ERP. No entanto, essas diferenças vão-se acumulando e, a partir do segundo 45, já é notável a diferença nos resultados entre todas as estruturas.

O galgamento diminui o seu valor com a mudança da estrutura lisa (EL) para uma estrutura rugosa (ER), pois a capacidade de dissipação de energia da onda quando interage com a estrutura é maior nesta última e a reflexão é menor. A estrutura rugosa (ER), pelo menor valor de galgamento obtido, 1.3995 l/s/m, é aquela que mais dissipa a energia da onda, já que é a que tem menor transmissão por galgamento e uma das menos refletoras (ver Tabela 5.1). Contrariamente a esta, a estrutura lisa (EL) apresenta um valor de galgamento muito superior às outras, 2.851 l/s/m, sendo a que menos dissipa a energia da onda e a que mais reflete.

A diferente disposição dos blocos das estruturas rugosa-porosa (ERP) e porosa (2) (EP2), fazem com que estas simulem individualmente as peças do manto e, embora a porosidade seja igual para os dois casos, a disposição geométrica das peças no manto é diferente fazendo com que a sua rugosidade seja diferente. É importante referir que para a estrutura EP2, com o estreitamento do manto no sentido de propagação da onda incidente, o espaçamento entre blocos também diminui no mesmo sentido por forma a garantir os 35% de porosidade no manto. Essa diminuição não permite o total preenchimento dos espaços entre blocos por partículas e como a superfície que não apresenta rugosidade, torna o seu comportamento mais parecido à estrutura lisa, o que pode ser a causa do maior valor do galgamento.

Era esperado que a estrutura com menor valor de galgamento fosse a estrutura rugosa-porosa (ERP), pois a dissipação de energia da onda incidente dá-se através da rugosidade da estrutura e permite o escoamento através da porosidade existente. Contudo o valor obtido para esta estrutura é muito próximo da estrutura que mais se aproxima da estrutura experimental (Estrutura rugosa, ER) apresentando, ainda assim, um valor superior ao valor de galgamento desta. A diferença pode dever-se à capacidade de dissipação apresentada pelas estruturas, uma vez que, para a condição de agitação para a qual ocorre galgamento, os coeficientes de reflexão são praticamente iguais, com uma diferença percentual de 4%. A ER, embora tenha apenas o

componente dissipador, a rugosidade acaba por dissipar mais que as componentes da ERP, que são a rugosidade e porosidade, levando com que o galgamento seja aproximadamente 10% inferior.

## 5.2. Modelação numérica 3D

O modelo SPH, como anteriormente referido, tem a particularidade de poder ser aplicado não só ao estudo de modelação numérica em 2D, mas também em 3D. Nesta seção aplica-se este método ao estudo de modelação numérica 3D para estudar a influência da alteração do ângulo da incidência da onda no galgamento.

O caso de estudo, tal como mostra a Figura 5.7, é uma estrutura de proteção marginal entre dois esporões que se situa na costa de Cova-Gala, no concelho da Figueira da Foz, distrito de Coimbra. Para a configuração específica destas estruturas, analisa-se a influência do ângulo de incidência das ondas no galgamento, estudo não passível de ser realizado em 2D.

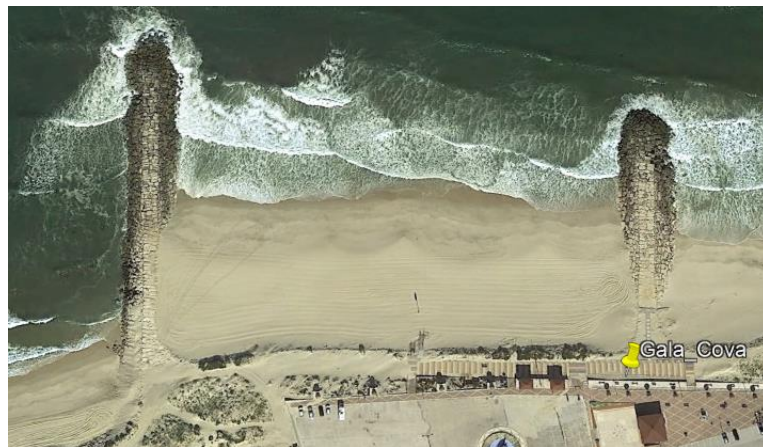
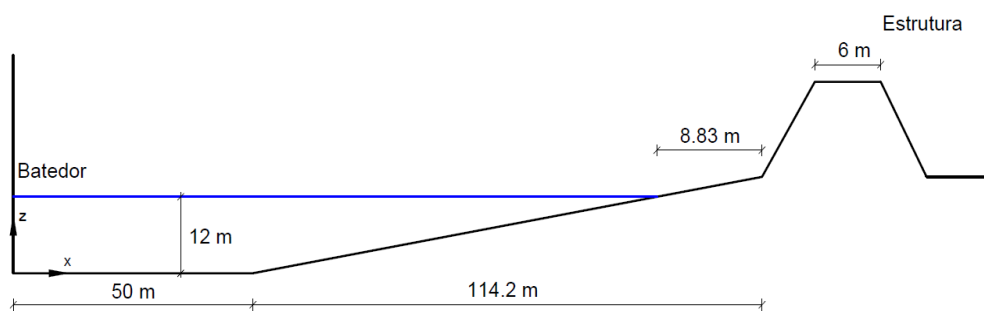


Figura 5.7 - Estruturas do caso de estudo, na costa de Cova Gala (@Google Earth).

A geometria representativa da estrutura em análise tem dimensões muito aproximadas das dimensões reais. O esporão de menor dimensão (direita) possui um comprimento de 95 m e o esporão de maior dimensão (esquerda) possui um comprimento de 130 m, sendo a largura do coroamento destes iguais

no valor de 6.0 m. A estrutura de proteção marginal apresenta um comprimento de 200 m.

Na simulação numérica considerou-se que a estrutura de proteção marginal e os esporões tem porosidade e rugosidade iguais. No entanto a proteção marginal possui declive de  $28^\circ$  e largura de 6.0 m enquanto que os esporões um declive de  $50^\circ$ . A batimetria é formada por um fundo liso e impermeável e, como mostra a Figura 5.8, é constituído por uma zona horizontal com 50 m de comprimento seguida de uma rampa de 123 m com um declive de 10.5% até ao pé da estrutura. O batedor encontra-se situado no início do canal, onde foi considerado uma profundidade constante de 12 m, obtendo-se assim uma zona de praia emersa com aproximadamente de 8.83 m de comprimento até ao pé da estrutura.



**Figura 5.8 – Perfil transversal central do tanque numérico, com a representação da estrutura de proteção marginal.**

As Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram as fronteiras laterais, a estrutura de proteção marginal, os esporões e a batimetria considerada na simulação numérica 3D.

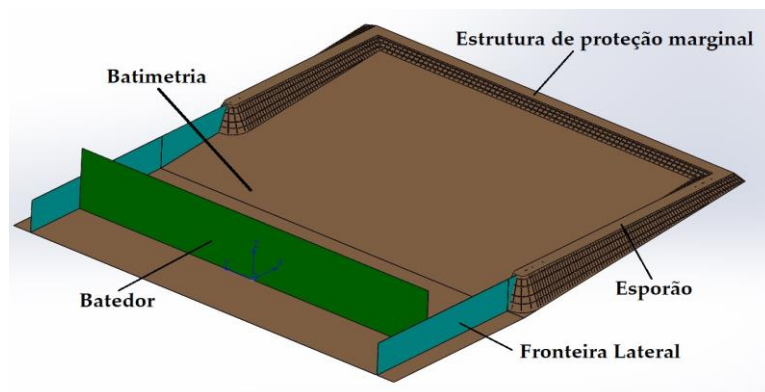


Figura 5.9 - Tanque numérico utilizado nas simulações para  $\beta = 0^\circ$ , com indicação das fronteiras laterais, da estrutura de proteção marginal, dos esporões e da batimetria simulada.

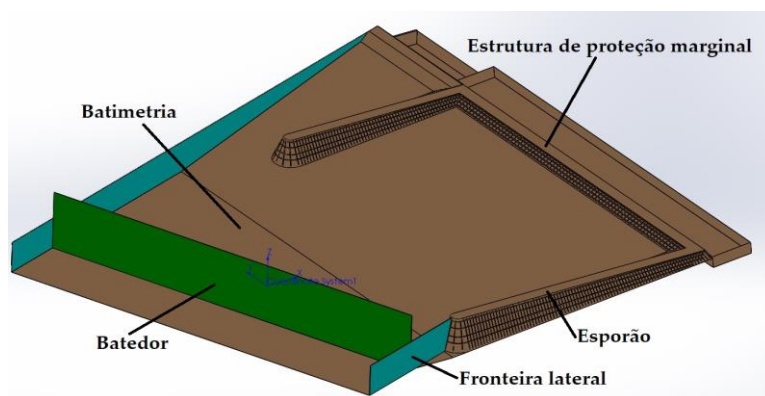


Figura 5.10 – Tanque numérico utilizado nas simulações para  $\beta = 20^\circ$ , com indicação das fronteiras laterais, da estrutura de proteção marginal, dos esporões e da batimetria simulada.

Dado o grande esforço computacional da aplicação do modelo a este caso em 3D, a distância entre partículas utilizada é 0.5 m, valor muito superior à que foi utilizado na modelação 2D ( $dp = 0.005$  m), o que, no entanto, garante o número mínimo recomendável de partículas em cada onda para simular a sua propagação. Cada simulação teve uma duração média de 4 dias em que foram simuladas 9 ondas.

Optou-se por simular dois valores de ângulos de incidência,  $\beta = 0^\circ$  (perpendicular à costa) e  $\beta = 20^\circ$ , de forma a avaliar variação no galgamento provocada por uma pequena variação do ângulo, tal como a referida como possível de ocorrer devido às alterações climáticas.

Em relação à condição de agitação simulada, inicialmente fez-se simulação para onda com incidência  $0^\circ$ , para a qual se obteve caudal galgado nulo. Neste sentido, para alcançar os objetivos pretendidos é imprescindível que ocorra galgamento.

Considerou-se, assim, uma nova condição de agitação,  $T = 20$  s e  $H = 6$  m, para a qual se obteve galgamentos para ambos os ângulos de incidência simulados,  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

O domínio computacional é constituído por 2043815 partículas para  $\beta = 0^\circ$  e 2514845 partículas para  $\beta = 20^\circ$ . É importante realçar que os números de partículas não são iguais para os dois casos porque, para  $\beta = 20^\circ$ , o canal tem largura maior que para  $\beta = 0^\circ$  para que as reflexões provenientes da fronteira lateral não influenciem a agitação que atinge as estruturas.

As Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam a posição das partículas para diferentes tempos de simulação para o caso de agitação com  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ , respetivamente.

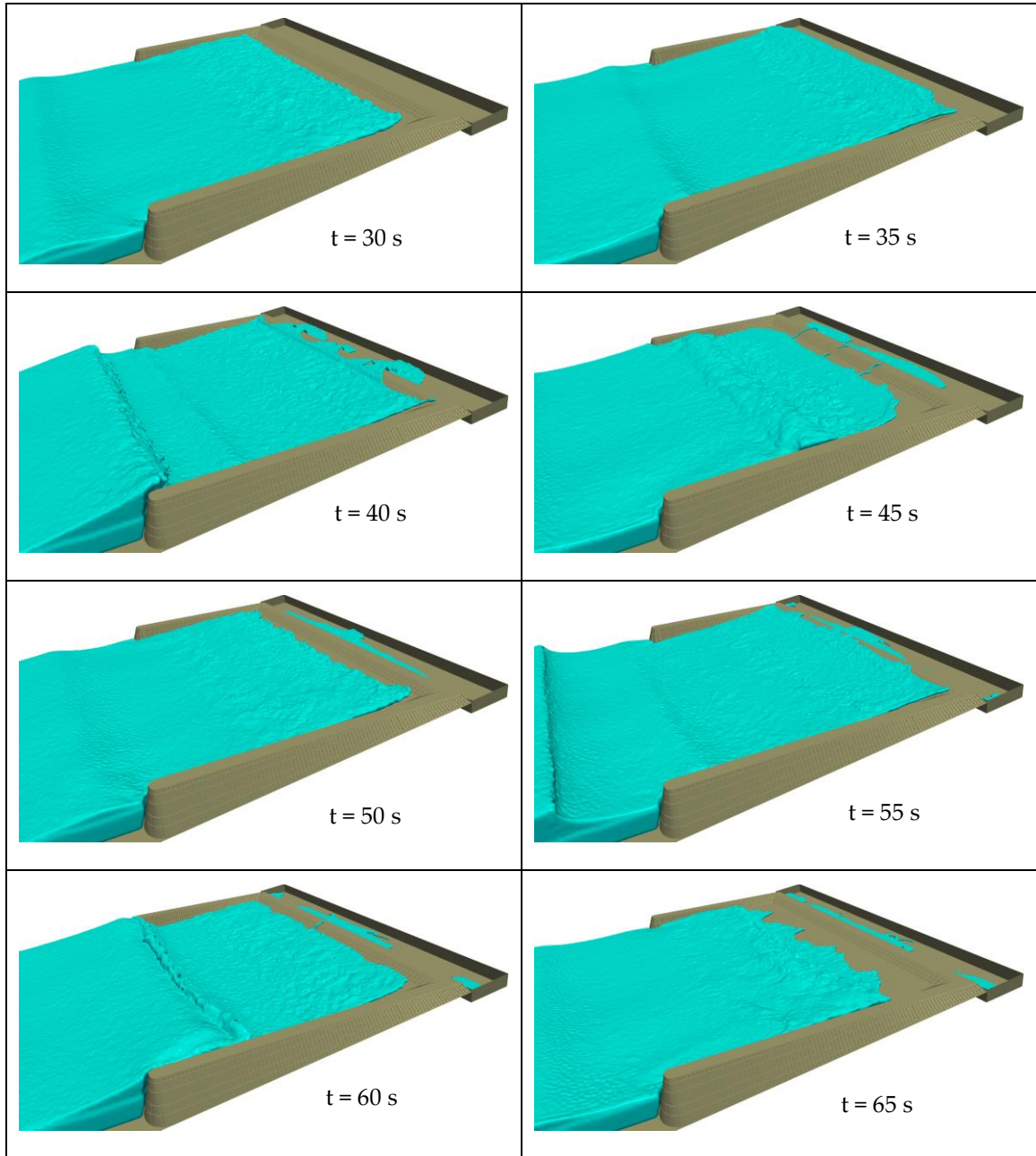
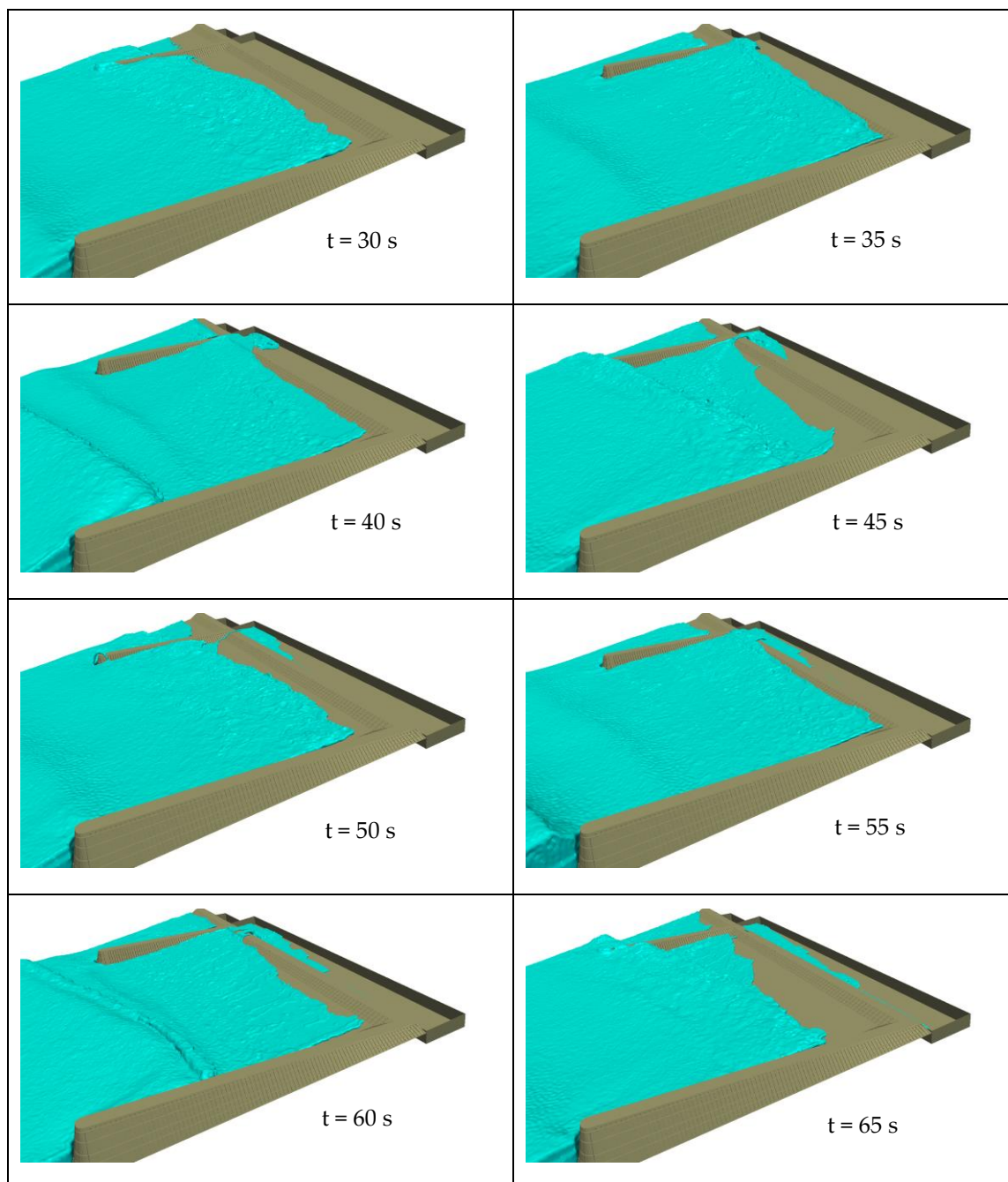


Figura 5.11 - Disposição das partículas na interação onda-estrutura 3D nas proximidades da estrutura para  $\beta = 0^\circ$ .



**Figura 5.12 - Disposição das partículas na interação onda-estrutura 3D nas proximidades da estrutura para  $\beta = 20^\circ$ .**

Da análise das Figura 5.11 e Figura 5.12, é possível verificar que, para  $t = 40$  s, ocorre galgamento da estrutura mas que a zona onde ocorre varia com o ângulo de incidência da onda. Efetivamente, o modelo DualSphysics na sua versão 3D permite reproduzir os vários fenómenos da interação onda-estrutura, desde a

alteração da agitação na sua propagação sobre a rampa a fenômenos relacionadas com a interação da onda com o fundo do tanque e/ou com a estrutura de proteção marginal. Exemplos destes fenômenos são: a propagação da onda e galgamento da estrutura ( $t = 40$  s), rebentação e reflexão da onda ( $t = 60$  s) e espraçamento ( $t = 65$  s).

Para  $\beta = 20^\circ$ , como o galgamento (transmissão) ocorre apenas numa zona concreta da estrutura, nessa zona a reflexão vai ser menor do que ao longo do resto da estrutura, ver Figura 5.12. Isso acontece devido ao ângulo de incidência da onda e também porque, como se sabe, a energia da onda é dada pelo somatório da dissipação, reflexão e transmissão, sendo este último um fator preponderante para que a reflexão seja menor. Ao longo do resto da estrutura a transmissão é nula, logo vai existir maior reflexão da energia da onda. Para o caso de  $\beta = 0^\circ$  isto já não acontece pois, como é evidente na Figura 5.11, o galgamento vai ocorrer em vários pontos ao longo da estrutura de proteção marginal, logo a reflexão será menor na sua totalidade.

Para comparar a elevação da superfície livre em diversos pontos do tanque numérico, escolheram-se alguns pontos (S1, S2 e S3, Figura 5.13) onde se colocaram sondas numéricas que medem as elevações da superfície livre no tempo e planos ao longo do canal (P1, P2 e P3, Figura 5.13) que correspondem a cortes transversais segundo os eixos x e z e que possibilitam a visualização dos perfis de superfície livre no tempo. Estes pontos e planos foram utilizados na modelação 3D para obtenção de resultados de superfícies livres para  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

As Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 mostram os resultados da elevação da superfície livre nos diferentes pontos, enquanto que os perfis de superfície livre estão representados na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 para tempo de simulação 35.7 s.

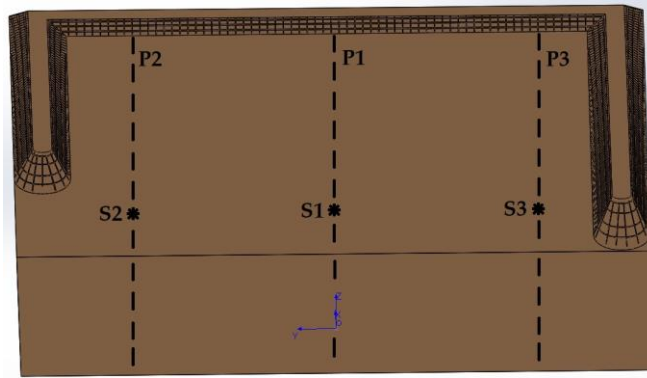


Figura 5.13 – Posicionamento dos pontos e dos planos ao longo do canal.

Estes pontos permitem a comparação da elevação da superfície livre obtidas para  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ . Os planos permitem analisar os diferentes perfis de superfície obtidos para os dois ângulos de agitação simulados.

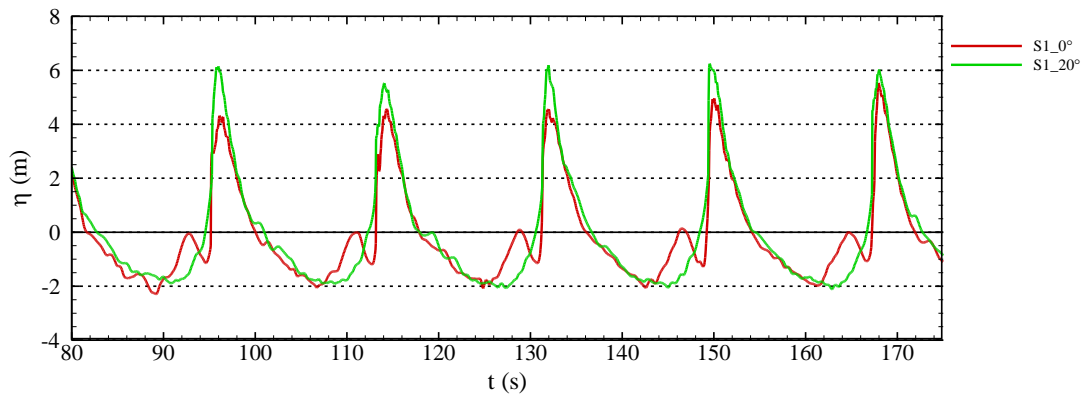


Figura 5.14 – Elevação de superfície livre no ponto S1 obtida na simulação 3D.

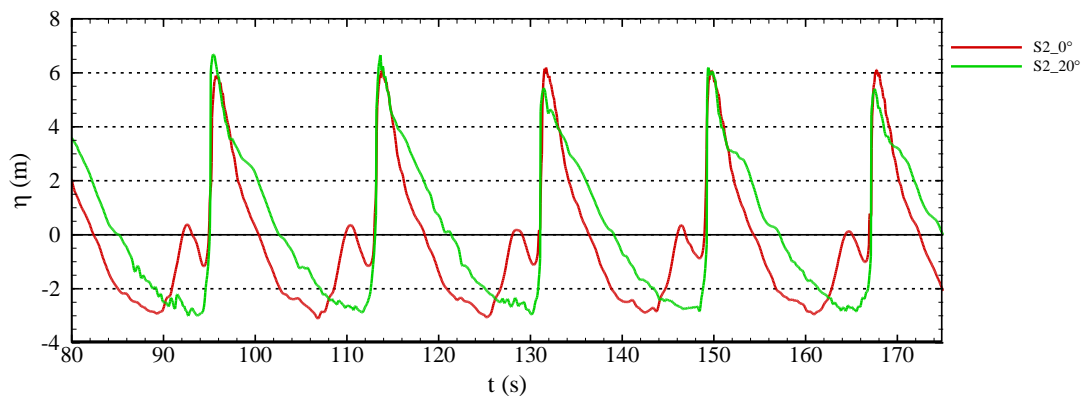


Figura 5.15 - Elevação de superfície livre no ponto S2 obtida na simulação 3D.

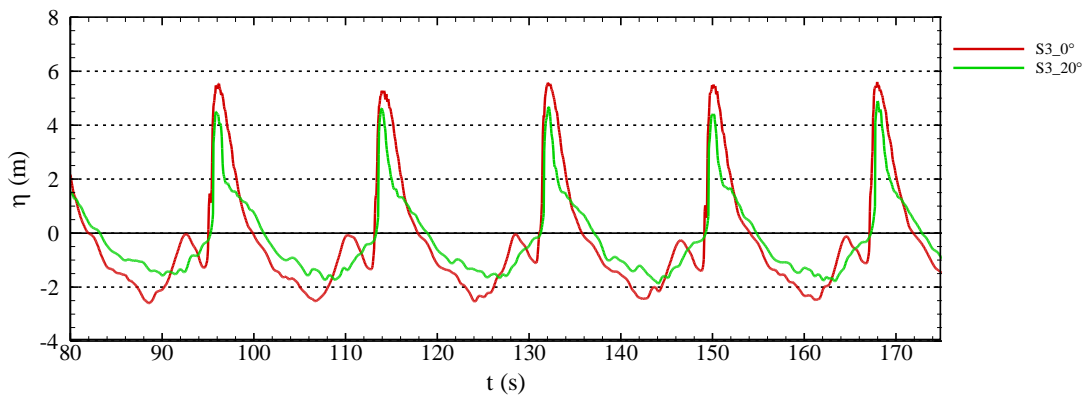


Figura 5.16 - Elevação de superfície livre no ponto S3 obtida na simulação 3D.

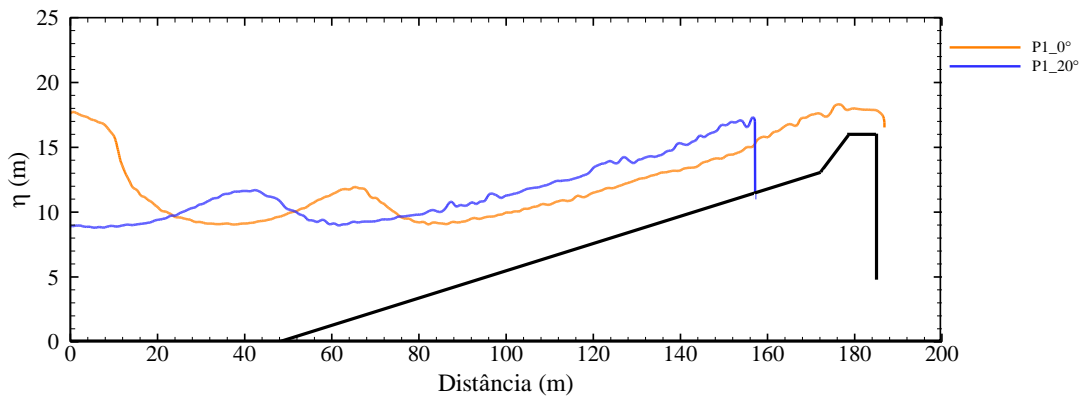


Figura 5.17 – Perfil longitudinal da superfície livre no plano P1.

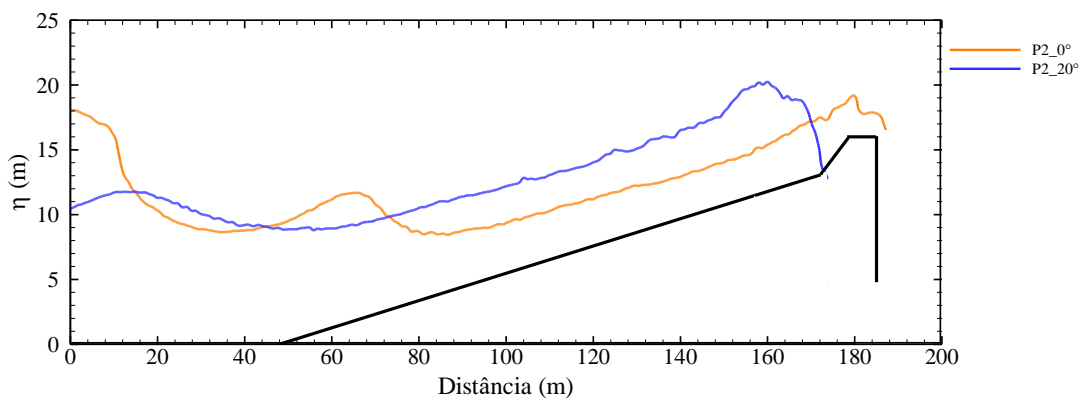
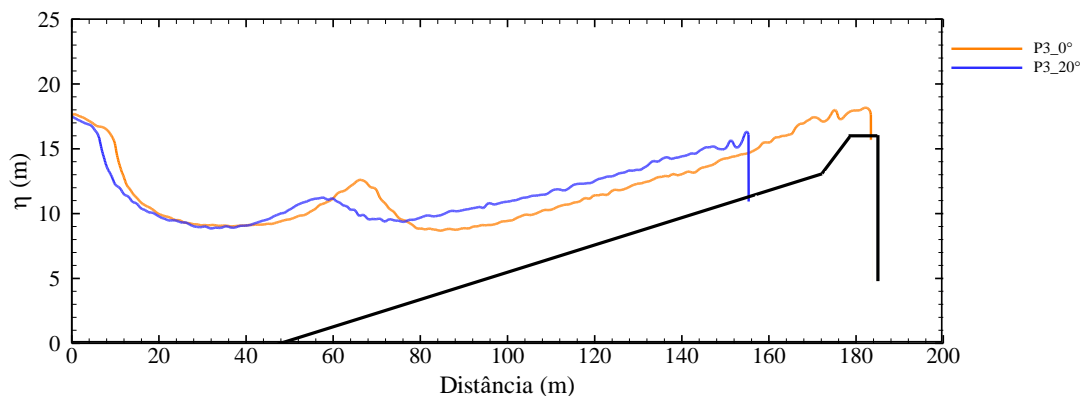


Figura 5.18 – Perfil longitudinal da superfície livre no plano P2.



**Figura 5.19 – Perfil longitudinal da superfície livre do plano P3.**

Das Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 é visível que para  $\beta = 0^\circ$  a altura de onda (e a sua forma) não varia significativamente entre os três pontos situados entre os esporões, o que se pode dever a que a onda incidente é semelhante ao longo da largura do tanque simulado. No entanto, como a estrutura é porosa a reflexão não é totalmente igual, daí que as cavas e as cristas dos diferentes pontos apresentem diferenças na altura, mesmo sendo a onda incidente perpendicular a estrutura. Isto não se verifica para  $\beta = 20^\circ$ , pois a energia da onda concentra-se mais numa determinada zona da largura do tanque. Nessa zona a interação da onda com estrutura é evidente (Figura 5.12,  $t = 40$  s), existindo uma zona da estrutura onde as ondas por vezes são refletidas antes de interagir com a estrutura de proteção marginal, ou seja as ondas espraiam na zona de praia emersa e são refletidas. Ainda assim, as elevações de superfície livre obtidas para  $\beta = 0^\circ$  não diferem muito das obtidas para  $\beta = 20^\circ$ , apresentando, nos pontos (S1, S2 e S3) , diferenças a nível de reflexão e pequenas diferenças nas alturas das cristas (S1 e S3) e das cavas (S3), estando a cava do ponto (S2) desfasada no tempo relativamente a  $\beta = 20^\circ$ .

Das Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 pode-se verificar que, para  $\beta = 0^\circ$ , os perfis da superfície livre, independentemente dos planos (P1, P2 e P3), apresentam perfis que atingem distâncias maiores relativamente às distâncias apresentadas nos perfis para  $\beta = 20^\circ$ . No entanto, para  $\beta = 20^\circ$  o galgamento está concentrado numa zona (Figura 5.20) que se encontra entre o plano P2 e o

esporão e, como tal, o perfil onde se dá o galgamento não é aqui representado para  $\beta = 20^\circ$ , enquanto para  $\beta = 0^\circ$  o galgamento está representado.

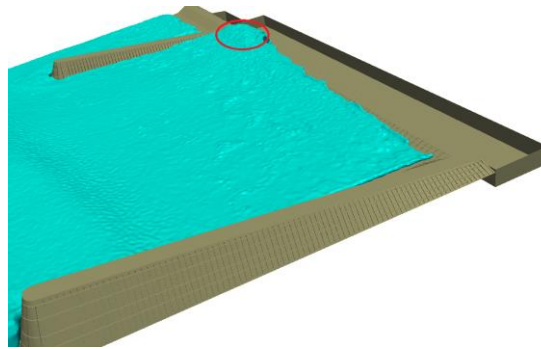


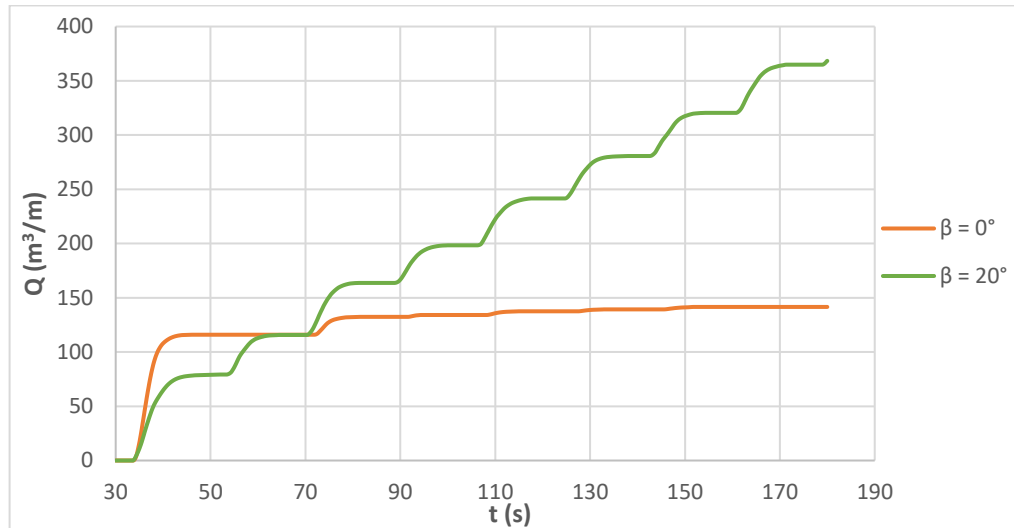
Figura 5.20 - Representação do galgamento localizado na estrutura de proteção marginal para  $t = 35.7s$  com  $\beta = 20^\circ$ .

Também pode-se constatar que para os perfis P1 e P2 (Figura 5.17 e Figura 5.18), independentemente dos ângulos de incidência da onda, ocorrem os mesmo tipos de fenómenos (rebentação da onda, empolamento e nova rebentação), mas em posições diferentes, ocorrendo mais longe da estrutura de proteção marginal no caso de  $\beta = 20^\circ$ . Em relação ao perfil do P3, como é visível na Figura 5.19, já não ocorre essa diferença entre o perfil da envolvente da superfície livre de  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$  com os fenómenos a ocorrerem em posições muito aproximados

Comparando os 3 perfis obtidos para  $\beta = 0^\circ$  é visível que apresentam sempre perfis idênticos, independentemente do plano (P1, P2 e P3). Já para  $\beta = 20^\circ$  os planos apresentam perfis diferentes pois a onda incidente não tem direção perpendicular à estrutura de proteção marginal.

No que se refere ao galgamento, analisou-se a evolução do volume que galga a estrutura ao longo do tempo considerando toda a estrutura de proteção marginal simulada, Figura 5.21. Para o caso em estudo, na qual a estrutura de proteção marginal se encontra entre dois esporões, não se verifica a diminuição do galgamento com o aumento do ângulo de incidência das ondas, tal como se pode observar. Efetivamente, após a estabilização da simulação, isto é, após aproximadamente 90 s de simulação, a cada onda galgada corresponde em

média um caudal que é de  $5.12 \text{ m}^3/\text{m}$  para  $\beta = 0^\circ$  e de  $36.12 \text{ m}^3/\text{m}$  para  $\beta = 20^\circ$ . Isto difere dos resultados encontrados por outros autores (Besley, 1999), no qual se verifica uma redução do galgamento com o aumento do ângulo de incidência da onda.

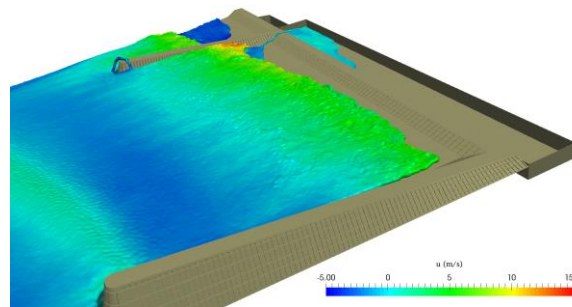


**Figura 5.21 - Volume galgado ao longo do tempo.**

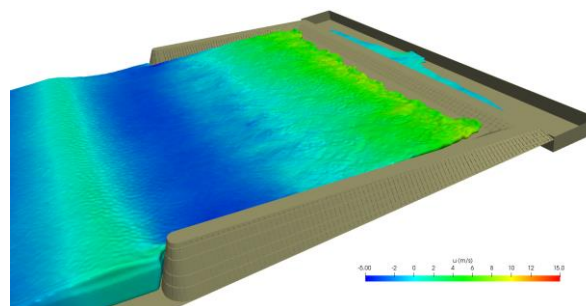
Analisando a Figura 5.21 pode-se observar que o galgamento para  $\beta = 0^\circ$  é superior ao obtido para  $\beta = 20^\circ$  apenas no início da simulação, isto é, do segundo 35, onde ocorre o galgamento da primeira onda, até aproximadamente ao segundo 60, mantendo um mesmo volume total galgado até ao segundo 72. Este é o caudal da primeira onda incidente à estrutura, quando o efeito da reflexão na agitação total junto à estrutura ainda não se fazia sentir.

A partir do segundo 72 até ao tempo final de simulação (180 s), verifica-se uma diferença substancial no volume galgado por onda, sendo para  $\beta = 20^\circ$  muito superior ao de  $\beta = 0^\circ$ , como referido anteriormente. Aqui, já se sente a presença do fenómeno de reflexão. Efetivamente, para  $\beta = 0^\circ$  e a partir da terceira onda, após a rebentação que ocorre devido a diminuição da profundidade, surge uma segunda rebentação devido a interação da onda incidente com a onda refletida. Isto leva a uma segunda dissipação da energia da onda incidente, reduzindo a energia que será transmitida por galgamento e, como tal, o caudal galgado passa a ser menor. Para  $\beta = 20^\circ$  a segunda rebentação também acontece, mas

parece ser menos dissipativa, levando a que a transmissão por galgamento e, conseqüentemente, o caudal galgado, seja superior. Isto pode dever-se à influência da interação que ocorre entre a onda incidente e o esporão de menor comprimento, pois a onda ao interagir com o esporão é refletida em direção a estrutura de proteção marginal, concentrando nesta maior energia. Importa realçar que esta interação que se dá ao longo do esporão vai ocorrendo progressivamente no tempo, desde o momento em que atinge a cabeça do esporão até ao que atinge a estrutura de proteção marginal, alterando a onda que se propaga na direção da estrutura de proteção marginal. Isto faz com que, junto do esporão, haja um aumento de velocidade e, conseqüentemente, um aumento do volume galgado nessa zona da estrutura de proteção marginal, próximo desse esporão (Figura 5.23), o que não se verifica para  $\beta = 0^\circ$  (Figura 5.22).



**Figura 5.22 -Representação da velocidade e do galgamento numa zona concreta da estrutura de proteção marginal para  $\beta = 20^\circ$ .**



**Figura 5.23- Representação da velocidade e do galgamento ao longo da estrutura de proteção marginal para  $\beta = 0^\circ$**

Esta modelação 3D, pelo tempo de cálculo e pela complexidade dos fenómenos envolvidos, é uma área que se encontra em desenvolvimento. Este caso de estudo, que se encontra em análise no âmbito de um projeto financiado pelo CYTED, o projeto PROTOCOL, ainda não foi ensaiado em modelo físico 3D e, por isso, não existem ainda dados para a sua calibração e validação. No entanto, a reprodução dos fenómenos parece estar próximo do que ocorre na natureza, com um galgamento obtido para  $\beta = 20^\circ$  concentrado numa zona em que existe um edifício, na qual, como mostra a Figura 5.24, ocorreu galgamento e se teve a necessidade de construir um muro para o proteger dos galgamentos.



**Figura 5.24 – Edifício localizado junto à estrutura de proteção marginal da Praia de Cova, numa zona entre dois esporões.**

## Capítulo 6

### Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi estudada numericamente a influência do ângulo da onda incidente no galgamento de uma estrutura de proteção marginal entre esporões, aplicando o método SPH, com recurso a modelação numérico 3D. Este método baseia-se no método lagrangiano e encontra-se implementado no código DualSPHysics, permitindo modelar o caso de estudo tanto em 2D como em 3D.

O modelo foi inicialmente validado em 2D, onde se simulou uma estrutura marginal com diferentes rugosidades e/ou porosidades de forma a seleccionar qual a que mais se aproxima da resposta, ao nível de superfície livre e do galgamento, de uma estrutura de proteção marginal porosa, com base em ensaios em modelo físico anteriormente realizados.

A aplicação em 2D iniciou-se com uma análise de sensibilidade onde foi verificado a influência do valor da distância inicial das partículas nos resultados da elevação da superfície livre e no tempo de cálculo da simulação, que permitiu concluir que com o valor de 0.01 m se obtinha uma boa resolução com um tempo de cálculo razoável. No entanto, sendo o galgamento muito sensível à distância inicial de partículas, optou-se por um valor de distância inicial ligeiramente inferior, de 0.005 m.

A validação numérica permitiu concluir que os resultados da superfície livre e do caudal medio de galgamento obtidos da modelação numérica apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos nos ensaios em modelo físico anteriormente realizados no LNEC (Viegas, 2014). A estrutura porosa foi a que apresentou os resultados mais próximos dos resultados dos ensaios experimentais a nível de superfície livre, com menor a diferença entre as séries temporais, para as condições de agitação e das sondas em análise. Relativamente ao caudal médio galgado obtido com a modelação numérica, para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.17$  m, a estrutura com os

resultados que mais se aproximam da estrutura experimental é a estrutura rugosa, apresentando uma diferença de 26%. Já para a condição de agitação  $T = 2.19$  s e  $H = 0.13$  m, a estrutura lisa é a que apresenta resultados de caudal com menor diferença dos obtidos nos ensaios experimentais, com um valor de 2,2% superior. Comparando as estruturas simuladas entre si, concluiu-se que a estrutura lisa é a estrutura que apresenta um maior coeficiente de reflexão e a estrutura rugosa-porosa a que apresenta o menor valor para as condições de agitação simuladas.

Uma vez definido o tipo de estrutura a simular em 3D, efetuou-se a simulação de um domínio que inclui os dois esporões e a estrutura de proteção marginal, todas porosas com agitação perpendicular à costa e diferindo  $20^\circ$  da perpendicular. Da modelação 3D verificou-se que o ângulo da onda incidente influencia o galgamento na estrutura de proteção marginal. Para os casos simulados neste estudo o galgamento aumentou com o aumento do ângulo de incidência das ondas em  $20^\circ$ . Os resultados da modelação 3D, mesmo encontrando-se em fase de desenvolvimento, mostrou ser muito importante no estudo da interação da onda-estrutura de proteção marginal, principalmente no estudo do ângulo da onda incidentes.

Para o trabalho a desenvolver no futuro pode ser muito interessante caracterizar a curva do galgamento em função do ângulo de incidência da onda e estudar outros casos de estruturas de proteção marginal que permitam reduzir o galgamento. Outro tema muito importante será a realização de ensaios em modelo físico que permita calibrar e verificar o modelo na sua versão 3D.

# Referência Bibliográfica

Afonso, L. (2011) 'Estudo Numérico do Galgamento de Estruturas de Protecção Costeira', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnologia/Universidade Nova, Portugal*.

Altomare, C. *et al.* (2015) 'Hybridization of the Wave Propagation Model SWASH and the Meshfree Particle Method SPH for Real Coastal Applications', *Coastal Engineering Journal*, 57(4), pp. 1550024. doi: 10.1142/S0578563415500242.

Altomare, C., Zhang, F. and Shang, S. (2018) 'A Numerical Tool to Simulate Real Breakwaters', *Journal of Hydrodynamics*, 30, pp. 95–96.

Besley, P. (1999) 'Overtopping of seawalls – Design and Assessment Manual', *R&D Technical Report W178, HR Wallingford Ltd*.

Brito, M. (2017) 'Desenvolvimento de Ferramenta Integrada para Simular Interações Onda-Estrutura-Estrutura', *9as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Portugal*.

Brito M. (2018) 'Numerical Modeling and Experimental Testing of an Oscillating Wave Surge Converter', *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), Portugal*.

Burcharth, H. F. and Hughes, S. A. (2005) 'Fundamentals of Design', *Engineer Manuals, (Part VI)*.

Canelas R. B., Brito M., García-Feal O., Domínguez J. M., Crespo A. J. C. 2018 Extending DualSPHysics with a Differential Variational Inequality: modeling fluid-mechanism interaction. *Applied Ocean Research*, 76:88-97. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.015.

Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. a and Pozueta, B. (2005) 'Manual Neural Network: NN\_Overtopping 2', *CLASH WP8--Rep., WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands*.

Costa, M., Silva, R. and Vitorino, J. (2001) 'Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa', *2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária - Associação Internacional de Navegação*.

Crespo, A. J. C. *et al.* (2015) 'DualSPHysics: Open-Source Parallel CFD Solver Based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)', *Computer Physics Communications*. Elsevier B.V., 187, pp. 204–216. doi: 10.1016/j.cpc.2014.10.004.

Crespo, A. J. C. *et al.* (2017) 'Towards Simulating Floating Offshore

Oscillating Water Column Converters with Smoothed Particle Hydrodynamics', *Coastal Engineering*, 126(May), pp. 11–26. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.05.001.

Crespo, A. J. C., Gómez-Gesteira, M. and Dalrymple, R. A. (2007) 'Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods', *Computers, Materials and Continua*, 5(3), pp. 173–184. doi: 10.3970/cmc.2007.005.173.

Didier, E. and Neves, G. (2010a) 'Modelação da Interacção entre uma Onda e uma Estrutura de Protecção Costeira usando um Modelo Numérico SPH - Smoothed Study of Wave Interaction with Coastal Structures using a SPH Numerical Model', *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(4), pp. 435–455. doi: ISBN- 13:9780521663960.

Didier, E. and Neves, G. (2010b) 'Modelação de Estruturas Marítimas usando um Modelo Numérico Smoothed Particle Hydrodynamics', *Artigo de Revista, Portugal*, pp. 1–19.

Didier, E. and Neves, M. (2009) 'Coastal Flow Simulation using SPH: Wave Overtopping on an Impermeable Coastal Structure', *4th International SPHERIC Workshop*.

Didier, E. and Neves, M. da G. (2010) 'Study of Wave Interaction with Coastal Structures using a SPH Numerical Model', *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(4), pp. 435–455.

EurOtop (2016) 'Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: An Overtopping Manual Largely based on European Research, but for Worldwide Application', *EurOtop Manual*, pp. 264.

Ferreira, R. M. C. D. M. (2016) 'Análise de Dados de Agitação num Ponto da Costa Marítima Portuguesa. Implicações para o Dimensionamento de Quebra-Mares Verticais', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnológica/Universidade Nova, Portugal*.

Gesteira, M. *et al.* (2010) 'SPHysics User Guide', (September), pp. 106. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

GIOC (2000) 'Volumen III. Obras costeras', *Documento de referencia*, Vol. 3, pp. 290.

Integrada, G. C. (2018) *Esporão*, *Revista de Gestão Integrada da Zona Costeira (RGCI)*. Available at: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/esporario.html> (Accessed: 12 February 2018).

Mansard, E. P. D. and Funke, E. R. (1980) 'The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a least Squares Method', in *The 17th Coastal*

*Engineering Conference*, pp. 154–172.

Martins, R. (2011) 'Análise da Interação entre uma Onda Regular e um Quebra-Mar Vertical usando um Modelo Numérico Smoothed Particle Hydrodynamics', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnologia/Universidade Nova, Portugal*.

Mestre, R. (2015) 'Modelação Numérica da Reflexão e do Espraimento em Praias e em Estruturas Marítimas', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnologia/Universidade Nova, Portugal*.

Monaghan, J. J.; Kos, A. (1999) 'Solitary Waves on a Cretan Beach', *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(3), pp. 145–154. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:3(145).

Monaghan, J. J. (1992) 'Smoothed Particle Hydrodynamics', *Annual Review of Astro. Astrophys.*, pp. 543–574. doi: 10.1088/0034-4885/68/8/R01.

Pereira, L. J. S. (2018) 'Estudo Numérico de um Dispositivo de Aproveitamento de Energia das Ondas utilizando o Método SPH', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnologia/Universidade Nova, Portugal*.

Pita, C. (1986) 'Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Memória n.º 670, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.'

Reis, M. T. and Neves, M. da G. (2011) 'Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico baseado na Teoria da Onda em Condições de Água pouco Profunda', *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(4), pp. 397–417.

Takahashi, S. (2002) 'Design of Vertical Breakwaters', *Port and Airport research Institute - Japan*, 1996(34), pp. 126. doi: 10.1142/9789814282413\_0004.

USACE (1984) 'Shore Protection Manual', *US Army Corps of Engineers, Washington; D.C.*, 1(4th ed., 2 Vol), pp. 652. doi: 10.5962/bhl.title.47830.

USACE (2006) 'Coastal Engineering Manual [CEM]', *US Army Corps of Engineers, Washington; D.C.*

Viegas, M. D. L. (2014) 'Modelação Física do Galgamento do Quebra-Mar do Porto de Albufeira', *Tese de mestrado, Faculdade Ciências e Tecnologia/Universidade Nova, Portugal*.

Waal, J. P. De and Meer, J. W. Van Der (1992) 'Wave Runup and Overtopping on Coastal Structures CHAPTER 134', *23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy*, (i), pp. 1758–1771.