



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Modelação Numérica do Galgamento em Estruturas Marítimas Porosas

Maria Sofia Charters Oliveira Reis de Mariz

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Professor Doutor António Jorge Silva Guerreiro Monteiro
Orientadores: Professor Doutor António Alberto Pires Silva
Doutora Maria Teresa Leal Gonçalves Veloso dos Reis
Vogais: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira
Doutor Eric Lionel Didier

Novembro 2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Professor António Alberto Pires Silva e à Eng.^a Teresa Reis, o meu orientador e co-orientadora, respectivamente, pela ajuda preciosa que me deram para a elaboração deste trabalho, desde toda a ajuda técnica que foi fundamental, como também toda a motivação que me transmitiram. Foi sem dúvida um privilégio ter desenvolvido esta dissertação sob as suas orientações. Agradeço também à Eng.^a Graça Neves por toda a ajuda e apoio que me deu ao longo de todo o trabalho.

Agradeço ao Dr. Keming Hu por toda a cooperação e prontidão na resolução dos problemas que surgiram aquando da utilização do modelo numérico AMAZON.

Agradeço ainda à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento do projecto PTDC/ECM/114109/2009, “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic para aplicações a estruturas costeiras” que proporcionou o estudo do quebra-mar de Albufeira, disponibilizando plantas e perfis da estrutura.

Aos meus amigos quero agradecer, de um modo muito especial, por toda a amizade, alegria e apoio que me deram ao longo de todo o curso. Agradeço, em especial, à Aisha Mamade e à Ana Ferraz que nesta fase final de curso foram muito importantes para mim.

Por fim, agradeço em especial aos meus pais, à minha irmã, aos meus avós e também aos restantes membros da família que com toda a confiança sempre me apoiaram na minha decisão de ser Engenheira Civil e me proporcionaram todas as condições para realizar este mestrado da melhor forma possível.

RESUMO

O galgamento é um fenómeno que ocorre em estruturas marítimas se o espraimento for suficientemente elevado para permitir a passagem de água sobre o coroamento da estrutura. Dependendo da forma como as ondas incidem na estrutura, do nível do mar e das condições atmosféricas, o galgamento pode dar-se por diferentes vias: veia líquida contínua sobre a superfície do coroamento, salpicos ou borrifos. Neste trabalho, o fenómeno do galgamento foi estudado aplicando um modelo numérico, AMAZON, formulações empíricas e uma ferramenta neuronal ao quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, que constitui uma estrutura marítima porosa.

O modelo AMAZON utiliza as equações não lineares de água pouco profunda (Hu, 2000). Na sua aplicação e exploração fez-se uma análise de sensibilidade aos parâmetros que caracterizam a estrutura. Concluiu-se que a porosidade é o factor que mais influencia o galgamento, seguindo-se a velocidade máxima que o escoamento pode ter durante a transferência entre as camadas superficial e porosa da estrutura. Os parâmetros foram ajustados por comparação de resultados do caudal médio galgado com o modelo numérico IH-2VOF (Losada et al., 2008 e Mariz et al., 2012), baseado nas equações RANS, devido à impossibilidade de validação com dados de campo.

Utilizaram-se as formulações empíricas de Owen (1980) e de Pullen et al. (2007) e ainda a ferramenta neuronal, NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), quer à escala do protótipo, quer à escala do modelo. Por comparação de resultados verificou-se que a formulação de Owen apresenta menores diferenças em relação aos resultados do modelo AMAZON.

Palavras-Chave: Galgamento, Estruturas Porosas, Modelo AMAZON, Formulações Empíricas, Redes Neurais

ABSTRACT

Wave overtopping is a phenomenon that occurs in maritime structures when wave run-up is high enough to allow the water to pass over the structure's crest. Depending on the way the waves approach the structure, the sea level and the atmospheric conditions, overtopping can occur in three different types: 'green water', splash or spray. This phenomenon was studied by applying the numerical model, AMAZON, empirical formulations and artificial neural networks to the West breakwater of Albufeira's Fishing Harbor, which is a porous maritime structure.

AMAZON is a nonlinear shallow water equations numerical model (Hu, 2000). A sensitivity analysis of the parameters that characterize the porous structure was made. It was concluded that porosity is the factor that most influences wave overtopping, followed by the maximum velocity that the flow can have during the transfer between the free-flow (surface) and the porous layer ("Interface Permeability"). The parameters were adjusted by comparing AMAZON results of the mean overtopping discharge provided by the numerical model IH-2VOF (Losada et al., 2008 and Mariz et al., 2012), based on the RANS equations, due to the impossibility of validation with field data.

Owen's empirical formulation (1980), Pullen et al. (2007) equation and the artificial neural tool NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) were used both at prototype and at model scales. Comparison of the results showed that that the formulation of Owen presented the closest match to AMAZON outputs.

Keywords: Overtopping, Porous structures, AMAZON model, Empirical formulations, Artificial neuronal networks

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objectivos e Metodologia	1
1.3	Estruturação da Dissertação	2
2	CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DO GALGAMENTO E MÉTODOS DE CÁLCULO	3
2.1	Enquadramento	3
2.2	Factores Condicionantes	4
2.2.1	Agitação Marítima	4
2.2.2	Nível do Mar	6
2.2.3	Geometria da Estrutura	6
2.3	Formulações de Cálculo Empíricas	7
2.3.1	Introdução	7
2.3.2	Formulação Empírica de Owen (1980)	8
2.3.3	Metodologia do “Actual Manual dos Galgamentos” – EurOtop (Pullen et al., 2007)	10
2.4	Redes Neurais	11
2.5	Modelação Numérica	16
3	MODELO NUMÉRICO AMAZON	19
4	CASO DE ESTUDO	23
5	CÁLCULO E COMPARAÇÃO DOS CAUDAIS MÉDIOS GALGADOS	27
5.1	Enquadramento	27
5.2	Modelo Numérico AMAZON	29
5.2.1	Análise de sensibilidade com agitação regular	29
5.2.1.1	Protótipo	29
5.2.1.2	Modelo e comparação com os resultados obtidos em Protótipo	37
5.2.2	Ajustamento dos parâmetros e análise para as condições de agitação irregular	42
5.3	Formulações Empíricas	42
5.3.1	Formulação Empírica de Owen (1980)	42
5.3.2	Metodologia do “Actual Manual dos Galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007)	44
5.4	Redes Neurais Artificiais	46
5.5	Comparação e Discussão de Resultados	48
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS	59

Anexo A – Ficheiros MATLAB® utilizados para tratamento da elevação da superfície livre	59
Anexo B – Exemplo da introdução de dados no modelo AMAZON	65
Anexo C – Resultados do caudal médio galgado, q , calculados através do modelo AMAZON	67
Anexo D – Exemplo da introdução de dados na folha de cálculo da formulação empírica de Owen (1980).....	75
Anexo E – Exemplo da introdução de dados para obtenção do caudal médio galgado, segundo Pullen et al. (2007).....	77
Anexo F – Exemplo da introdução de dados para obtenção do caudal médio galgado, na NN_OVERTOPPING2	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Rebentação progressiva (“spilling”) (USACE, 2006).	4
Figura 2.2 – Rebentação mergulhante (“plunging”) (USACE, 2006).	5
Figura 2.3 – Rebentação colapsante (“collapsing”) (USACE, 2006).	5
Figura 2.4 - Rebentação de fundo (“surging”) (USACE, 2006).	5
Figura 2.5 – Representação esquemática do ângulo de incidência das ondas (β) (Brito, 2007).	5
Figura 2.6 – Representação esquemática de alguns parâmetros que definem a geometria da estrutura e influenciam o galgamento, adaptada a partir de Coeveld et al. (2005).	6
Figura 2.7 – Estruturas simples de talude permeáveis (adaptado de Brito, 2007).	9
Figura 2.8 – Configuração da rede neuronal artificial do galgamento, em três camadas (adaptada de Pullen et al., 2007).	12
Figura 2.9 – Representação dos parâmetros intervenientes na definição da NN_OVERTOPPING2 em estudo (Coeveld et al., 2005).	13
Figura 2.10 – Partes da estrutura costeira, adaptado (Coeveld et al., 2005).	15
Figura 3.1 – Representação esquemática da transferência de água entre a camada porosa e a camada superficial no modelo AMAZON (Reis & Neves, 2010), a) com a célula de cálculo vazia ou parcialmente preenchida e b) com a célula de cálculo totalmente preenchida.	22
Figura 4.1 – Quebra-mares Nascente e Poente do Porto de Pesca de Albufeira.	23
Figura 4.2 – Perfil do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.	24
Figura 4.3 – Planta do porto de pesca e dos dois quebra-mares, Nascente e Poente. A secção de estudo para a campanha de campo está indicada no quebra-mar Poente.	24
Figura 4.4 – (A) Imagem da área do Porto de Pesca de Albufeira (adaptada do Google Earth, 2006) com indicação da zona onde serão realizados os trabalhos de batimetria, localização da câmara de vídeo e transdutor de pressão aos ~10m de profundidade; (B) Quebra-mar Poente do Porto de Albufeira onde decorrerão as campanhas de campo com indicação da secção a estudar; (C) Representação esquemática da secção do quebra-mar e posicionamento dos equipamentos (PTs e ADV) (Didier et al., 2011).	25
Figura 5.1 – Representação das camadas porosas da estrutura no modelo numérico para as opções A e B.	28
Figura 5.2 – Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada do quebra-mar com uma única camada porosa (a vermelho), dos fundos e passadiço de betão impermeáveis (a amarelo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde) e respectivas coordenadas, em protótipo.	30
Figura 5.3 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1100$ e $T= 10s$ na opção A.	32
Figura 5.4 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 10s$ na opção A.	32
Figura 5.5 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1800$ e $T= 10s$ na opção A.	33
Figura 5.6 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 12s$ na opção A.	34
Figura 5.7 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , α , β e IP do meio poroso, para $T= 10s$ na opção A.	35
Figura 5.8 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 12s$ na opção A.	35
Figura 5.9 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 10s$ na opção B.	36
Figura 5.10 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 10s$ na opção B.	37
Figura 5.11 – Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada do quebra-mar com uma única camada porosa (a vermelho), dos fundos e passadiço de betão	

impermeáveis (a amarelo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde) e respectivas coordenadas, à escala 1:30.....	38
Figura 5.12 – Variação do caudal médio galgado, q , com a variação do parâmetro n , α , β e IP do meio poroso calculado com a equação de Forchheimer, com a variação de IP recorrendo à equação de Darcy e considerando a estrutura impermeável, para $T= 2.19s$, na opção A à escala 1:30.	39
Figura 5.13 – Altura significativa na sonda do pé de talude, H_s , com a variação do parâmetro n , α , β e IP do meio poroso calculado com a equação de Forchheimer, com a variação de IP recorrendo à equação de Darcy e considerando a estrutura impermeável, para $T= 2.19s$, na opção A à escala 1:30.	40
Figura 5.14 – Comparação dos resultados de caudal médio galgado, q , recorrendo à equação de Forchheimer no modelo AMAZON, aplicado à escala do protótipo e à escala 1:30, para $T= 12s$	41
Figura 5.15 – Comparação dos resultados da altura significativa na sonda do pé de talude, $H_{s \ x=0m}$, recorrendo à equação de Forchheimer no modelo AMAZON, aplicado à escala do protótipo e à escala 1:30, para $T= 12s$	41
Figura 5.16 – Comparação entre os caudais médios galgados obtidos no modelo numérico AMAZON, q_{AMAZON} , e os caudais médios galgados obtidos através das formulações empíricas e da NN_OVERTOPPING2, $q_{restantes \ formulações}$	50
Figura 5.17 – Comparação entre os pequenos caudais médios galgados obtidos no modelo numérico AMAZON, q_{AMAZON} , e os pequenos caudais médios galgados obtidos através das formulações empíricas e da NN_OVERTOPPING2, $q_{restantes \ formulações}$	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes empíricos A e B para estruturas simples de talude, Owen (1980).....	9
Tabela 2.2 – Coeficientes de rugosidade. Adaptado de Besley (1999).....	10
Tabela 2.3 – Valores do coeficiente de rugosidade/permeabilidade, γ_f , para estruturas com manto permeável e com 1:1.5 de declive do talude, os valores a itálico são estimados/extrapolados – adaptado Pullen et al. (2007).	11
Tabela 2.4 – Valores do coeficiente rugosidade/permeabilidade, para alguns tipos de materiais constituintes da camada (Coeveld et al., 2005).	15
Tabela 5.1 – Valores máximos de IP em m/s à escala de protótipo, opção A.....	31
Tabela 5.2 – Valores máximos de IP em m/s à escala de protótipo, opção B.....	31
Tabela 5.3 – Valores máximos de IP em m/s à escala 1:30.	38
Tabela 5.4 – casos ensaiados à escala 1:30, na opção A.	39
Tabela 5.5 – Resultados do caudal médio galgado, q, e alturas de onda significativa, média e máxima no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, $H_{m\ x=0m}$ e $H_{m\acute{a}x\ x=0m}$, respectivamente, com o espectro JONSWAP e ondas regulares, $n= IP= 0.35$, $\alpha= 1500$ e $\beta= 0.9$ do meio poroso, para $T= 10s$ e $T= 12s$, na opção A através do modelo AMAZON.	42
Tabela 5.6 – Resultados do caudal médio galgado, q, e do bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica de Owen (1980), em protótipo.	43
Tabela 5.7 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica de Owen (1980), à escala 1:30.	44
Tabela 5.8 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica presente no “actual manual dos galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007), em protótipo.....	45
Tabela 5.9 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica presente no “actual manual dos galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007), à escala 1:30	46
Tabela 5.10 – Resultados do caudal médio galgado, q, q' , $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$ obtidos através da ferramenta NN_OVERTOPPING2, em protótipo.	47
Tabela 5.11 – Resultados do caudal médio galgado, q, q' , $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$ obtidos através da ferramenta NN_OVERTOPPING2, à escala 1:30.	48
Tabela 5.12- Resultados da altura significativa, H_s , altura de onda média, H_m , altura de onda um décimo, $H_{1/10}$, período de onda médio, T_m , período de onda significativo, T_s , período de onda máximo, $T_{m\acute{a}x}$ e período um terço, $T_{1/3}$ na sonda de pé de talude, com o espectro JONSWAP, $n= IP= 0.35$, $\alpha= 1500$ e $\beta= 0.9$ do meio poroso, para $T= 10s$ e $T= 12s$, na opção A através do modelo AMAZON.	49
Tabela 5.13 – Resultados do caudal médio galgado, q, obtidos pelas formulações empíricas de Owen (1980) (Besley, 1999) e metodologia proposta no “actual manual dos galgamentos” – EurOtop, Pullen et al. (2007).	49
Tabela 5.14 – Resultados do caudal médio galgado, q, obtidos através do NN_OVERTOPPING2....	50

SIMBOLOGIA

a e b	Coeficientes da equação de Forchheimer considerados constantes no tempo e no espaço	[-]
A e B	Coeficientes empíricos que dependem da geometria da estrutura	[-]
A_c	Distância entre o meio da berma de coroamento e o nível da água, medida na vertical	[m]
B	Largura da berma da estrutura porosa, medida na horizontal	[m]
B_t	Largura da banquetta de fundo da estrutura	[m]
C_r	Coeficiente multiplicativo de q que tem em conta a berma permeável	[-]
d	Profundidade na fronteira de entrada do modelo AMAZON	[m]
d_s	Profundidade no pé da estrutura	[m]
D	Diâmetro nominal do material constituinte do manto da estrutura	[m]
D_{50}	Diâmetro mediano calculado a partir das características do enrocamento da estrutura	[m]
f_p	Frequência espectral de pico	[Hz]
Fr	Número de Froude ($= v/\sqrt{(g D)}$)	[-]
g	Aceleração da gravidade, (= 9.81)	[m.s ⁻²]
G_c	Largura do coroamento	[m]
h	Profundidade	[m]
h_b	Profundidade medida no centro da berma	[m]
h_t	Profundidade na banquetta de fundo da estrutura	[m]
H	Altura da onda	[m]
H_0	Altura de onda ao largo	[m]

$H_{1/10}$	Altura de onda correspondente à média do décimo mais elevado das alturas de onda num registo	[m]
H_m	Altura de onda média	[m]
H_{m0}	Altura significativa calculada com o momento de ordem zero do espectro (m_0)	[m]
$H_{m\acute{a}x}$	Altura de onda máxima	[m]
H_s	Altura da onda significativa, correspondente à média do terço mais elevado das alturas de onda num registo	[m]
$H_{s\text{ AMAZON}}$	Altura da onda significativa introduzida como dado de entrada para geração de agitação na fronteira de entrada (sonda 1 da Figura 5.2) no modelo AMAZON	[m]
I	Gradiente hidráulico	[-]
IP	Velocidade máxima que o escoamento pode ter durante a transferência entre a camada superficial e a camada porosa (“interface Permeability”)	[m.s ⁻¹]
$IP_{m\acute{a}x}$	Valor máximo de IP	[m.s ⁻¹]
K	Condutividade hidráulica (ou coeficiente de Darcy)	[m.s ⁻¹]
L	Comprimento de onda	[m]
L_0	Comprimento de onda ao largo	[m]
L_s	Comprimento de onda em águas pouco profundas; aproximadamente a distância desde o pé da estrutura até à fronteira de entrada do modelo AMAZON	[m]
m_i	Momento espectral de ordem i ($= \int_{f_1}^{f_2} f^i S(f) df = i$, em que $f_1 = \min(1/3 * f_p, 0.05)$ e $f_2 = 3 * f_p$)	[m ² .s ⁻ⁱ]
n	Porosidade da camada porosa, no modelo AMAZON	[-]
NR	Nível de repouso	[m]
q	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura	[m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹]
q'	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura corrigido para ter em conta	[m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹]

alguns efeitos de escala e de modelo

q_{AMAZON}	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura medido na sonda 7 da Figura 5.2 no modelo AMAZON	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$
$q_{\text{restantes formulações}}$	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura obtido através das formulações empíricas ou da NN_OVERTOPPING2	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$
$q_{n\%}$	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura correspondente ao quantil de ordem n%, na NN_OVERTOPPING2	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$
Q	Caudal médio galgado adimensionalizado por metro linear de estrutura	$[-]$
R	Bordo livre, R_c , adimensionalizado	$[-]$
R_c	Bordo livre é a distância, medida na vertical, entre o nível de repouso e o coroamento da estrutura	$[\text{m}]$
RP	Velocidade máxima que o escoamento pode ter na camada porosa (“Rock Permeability”).	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
s	Declividade da onda	$[-]$
s_0	Declividade da onda ao largo, determinada com T e H_0 , para ondulação regular	$[-]$
s_{0m}	Declividade da onda média, determinada com T_{0m} e H_{m0} , para agitação irregular	$[-]$
s_{0p}	Declividade da onda média, determinada com T_{0p} e H_{m0} , para agitação irregular	$[-]$
T	Período da onda no pé da estrutura	$[\text{s}]$
T_{0m}	Período da onda médio ao largo	$[\text{s}]$
T_{0p}	Período da onda associado ao pico espectral ao largo	$[\text{s}]$
$T_{1/3}$	Período significativo da onda, correspondente à média do terço mais elevado dos períodos de onda num registo	$[\text{s}]$
T_m	Período médio da onda na frente da estrutura	$[\text{s}]$
$T_{m-1,0}$	Período médio da onda na frente da estrutura calculado com os momentos	$[\text{s}]$

espectrais m_{-1} e m_0

$T_{m\acute{a}x}$	Período máximo da onda na frente da estrutura	[s]
T_p	Período de pico da onda na frente da estrutura	[s]
$T_{p\text{ AMAZON}}$	Período de pico de onda introduzido como dado de entrada para geração de agitação na fronteira de entrada (sonda 1 da Figura 5.2) no modelo AMAZON	[s]
T_s	Período significativo da onda na frente da estrutura, correspondente à média dos períodos de onda que formam H_s	[s]
u	Velocidade do escoamento na camada porosa (integrada na vertical)	[m.s ⁻¹]
α	Inclinação do talude	[°]
α e β	Coefficientes de atrito linear e não linear, respectivamente	[-]
α_b	Inclinação da berma	[°]
α_d	Inclinação do talude na zona abaixo da berma	[°]
α_u	Inclinação do talude na zona acima da berma	[°]
β	Ângulo de incidência das ondas, formado pelo ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a normal à estrutura	[°]
γ_f	Coefficiente de redução do galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura	[-]
γ_β	Coefficiente de redução devido ao ângulo de incidência da onda	[-]
ν	Viscosidade cinemática da água	[m ² .s ⁻¹]
ξ	Número de Iribarren ou parâmetro de rebentação	[-]
ξ_0	Número de Iribarren ao largo, determinado com s_0 , para ondas regulares	[-]
ξ_{0m}	Número de Iribarren, determinado com s_{0m}	[-]
ξ_{0p}	Número de Iribarren, determinado com s_{0p}	[-]
σ	Dispersão do espectro direccional	[-]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O estudo do desempenho de estruturas marítimas inclui a avaliação do galgamento ao longo da mesma. A medição do galgamento pode ser feita directamente na estrutura, através de instrumentação adequada para tal, ou pode ser ensaiada através de um modelo físico reduzido para observação do seu comportamento e medição do galgamento. Todavia, estas medições têm sempre custos associados e no caso da realização de um modelo físico este representa um custo acrescido não desprezável, ao valor da obra marítima.

No passado foram desenvolvidas algumas formulações empíricas que se baseiam em observações para estimar os coeficientes empíricos, geralmente feitas em modelo físico. Neste trabalho serão utilizadas as seguintes formulações:

- A metodologia proposta no “antigo manual dos galgamentos” do Reino Unido (Besley, 1999) que se baseia na formulação empírica de Owen (1980);
- A nova metodologia, sugerida no “actual manual dos galgamentos” – EurOtop (Pullen et al., 2007), cujos cálculos se realizam “on-line” (http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html).

Mais recentemente, foi desenvolvida uma outra ferramenta que também tem como base medições feitas em modelo físico. A base de dados para a qual foi calibrada está disponível “on-line” (<http://www.clash.ugent.be/>) e reúne 950 estruturas ensaiadas, o que perfaz quase dez mil condições de agitação. Esta ferramenta é a NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), baseia-se na análise de 700 redes neuronais e é também proposta no “actual manual dos galgamentos” (Pullen et al., 2007).

Actualmente, é possível estimar o galgamento através de modelos numéricos, embora se saiba que a fiabilidade destes modelos é menor do que a dos modelos físicos (Reis & Neves, 2010). Porém o seu custo é substancialmente inferior. Devido à crescente capacidade computacional, as ferramentas de modelação numérica encontram-se em progressivo melhoramento das suas potencialidades. A validação dos modelos numéricos encontra-se em curso e é feita através de medições quer na estrutura real, quer no modelo físico da mesma. Neste estudo recorreu-se ao modelo AMAZON, baseado na teoria de onda em condições de água pouco profunda (Hu, 2000), a fim de modelar numericamente o escoamento em interacção com uma estrutura marítima porosa.

1.2 Objectivos e Metodologia

O objectivo principal do presente trabalho prendeu-se com a modelação numérica do galgamento através do modelo AMAZON para uma estrutura porosa - quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

Quando se iniciou este estudo previa-se que existiriam medições *in situ*. No entanto, tal não se veio a verificar devido ao baixo nível de agitação marítima que se registou no passado Inverno marítimo. Devido a este facto, este trabalho foi sujeito a algumas readaptações ao nível de metodologia e objectivos.

Apresentam-se, seguidamente, os objectivos deste trabalho:

- Realização de uma revisão bibliográfica da literatura de referência;
- Cálculo do caudal médio galgado na estrutura em estudo através de formulações empíricas;
- Utilização do modelo neuronal NN_OVERTOPPING2 para estimar o galgamento na estrutura em estudo;
- Análise de sensibilidade e ajuste dos parâmetros intervenientes nas equações de escoamento na camada porosa no modelo AMAZON, à escala real e à escala 1:30;
- Comparação dos resultados obtidos com o modelo AMAZON em protótipo e à escala 1:30;
- Comparação de resultados entre as várias metodologias de estimação do caudal médio galgado, em protótipo.

1.3 Estruturação da Dissertação

Esta dissertação é constituída por seis capítulos, a que se adicionam as referências bibliográficas e seis Anexos. No Capítulo 1 apresenta-se a definição do objecto de estudo, a metodologia utilizada e o enquadramento do estudo. No Capítulo 2 apresenta-se uma caracterização do fenómeno do galgamento e ainda os métodos de estimação do mesmo (formulações empíricas, redes neuronais e modelação numérica). No Capítulo 3 o modelo AMAZON é descrito nos aspectos essenciais. No Capítulo 4 introduz-se o caso de estudo e as suas especificidades. No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos, tanto em protótipo como, na escala 1:30 para as diferentes ferramentas e são comparados os diversos resultados. No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais e algumas sugestões para futuros desenvolvimentos do modelo AMAZON.

2 CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DO GALGAMENTO E MÉTODOS DE CÁLCULO

2.1 Enquadramento

O fenómeno do galgamento ocorre quando um dado nível de agitação marítima em combinação com determinados níveis médios do mar permitem a passagem de água sobre o coroamento da estrutura. Dependendo do volume galgado, a estabilidade da estrutura em causa pode ser posta em risco (CIRIA/CUR/CETMEF, 2007).

O galgamento pode ser classificado em três formas dependendo do modo como é feita a passagem da água sobre o coroamento da estrutura (Besley, 1999).

A primeira forma é designada por “green water” e representa o galgamento que ocorre com veia líquida contínua sobre a superfície do coroamento da estrutura. Verifica-se quando o nível de espraçamento (“run-up”) é suficientemente elevado para que a passagem de água se dê tal como foi descrito.

A segunda forma de galgamento é denominada por “splash” (salpicos), ocorre durante a fase de rebentação das ondas sobre a estrutura produzindo volumes de água, que em algumas circunstâncias podem ser significativos, sob a forma de gotículas. A passagem pode ainda ser potenciada por vento incidente junto da estrutura.

A terceira forma designa-se por “spray” e é considerada a menos importante das três, uma vez que corresponde à passagem de “borrifos” gerados pela acção do vento na crista da onda junto da estrutura. O “spray” não contribui com volumes significativos de galgamento.

As formulações empíricas incluem a passagem de água sob a forma de “green water” e “splash” uma vez que estas duas formas ocorrem no modelo físico e o efeito do vento não é, em geral, modelado. Testes ao efeito do vento efectuados no passado permitiram concluir que o “spray” pode aumentar o caudal galgado em menos de 1 l/s/m (Besley, 1999).

Na análise do fenómeno do galgamento salientam-se os seguintes estudos: Besley (1999), Pullen et al. (2007). De notar ainda os estudos realizados, para o desenvolvimento de modelos numéricos, no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) entre os quais Reis & Neves (2010), Neves et al. (2010) e Didier et al. (2011).

2.2 Factores Condicionantes

2.2.1 Agitação Marítima

A agitação marítima é a principal responsável pela ocorrência de galgamento. Para caracterizar cada onda recorre-se frequentemente à declividade da onda (s) (2.1), que relaciona a altura da onda (H) com o comprimento de onda (L).

$$s = \frac{H}{L} \quad (2.1)$$

Na definição da declividade, e no caso de agitação irregular, utiliza-se a altura de onda significativa local, junto à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro (H_{m0}). Por sua vez, o comprimento de onda pode ser referente ao período médio (T_m) ou ao de pico (T_p), possibilitando a obtenção da declividade média, s_{0m} , e de pico, s_{0p} , respectivamente. O comprimento de onda ao largo (L_0) que, no âmbito da teoria linear da onda é calculado pela expressão (2.2), relaciona-se com o comprimento de onda no pé da estrutura (L), à profundidade h , pela relação de dispersão sob a forma apresentada na expressão (2.3).

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (2.2)$$

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad (2.3)$$

Dependendo da inclinação do talude (α) e da declividade da onda, o tipo de rebentação sobre a estrutura tomará diferentes formas, que podem ser caracterizadas através do parâmetro de rebentação ou Número de Iribarren (ξ), que se define pela expressão (2.4).

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.4)$$

O Número de Iribarren pode tomar várias formas consoante a declividade utilizada. No caso de se usar a declividade da onda ao largo (s_0), obtida pela expressão (2.1) com a altura e comprimento de onda ao largo (H_0 e L_0 , respectivamente), obtém-se o Número de Iribarren ao largo, ξ_0 . De forma análoga pode ser obtido o Número de Iribarren médio, ξ_{0m} , e de pico, ξ_{0p} , consoante este seja, respectivamente, calculado com s_{0m} e s_{0p} .

A rebentação da onda classifica-se segundo os seguintes tipos (USACE, 2006):

- Rebentação progressiva (“spilling”) – ($\xi_0 < 0.5$) a crista deforma-se e destabiliza-se, criando uma leve espuma sobre o talude, ocorre mais frequentemente em taludes mais suaves (Figura 2.1), este tipo de rebentação é também denominada por “macaréu”, termo proveniente do português do Brasil;

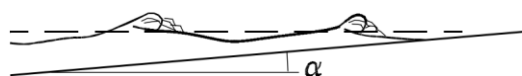


Figura 2.1 – Rebentação progressiva (“spilling”) (USACE, 2006).

- Rebentação mergulhante (“plunging”) – ($0.5 < \xi_0 < 3$) a crista da onda cria uma curvatura e cai sobre o talude originando grandes salpicos (Figura 2.2);

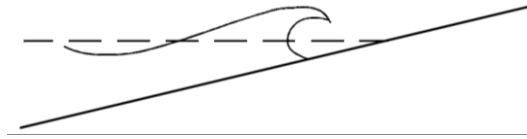


Figura 2.2 – Rebentação mergulhante (“plunging”) (USACE, 2006).

- Rebentação colapsante (“collapsing”) – ($3 < \xi_0 < 3.5$) a crista não rebenta inteiramente, não origina grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude, este tipo pode surgir pela sobreposição dos dois tipos de rebentação anteriormente descritos (Figura 2.3);

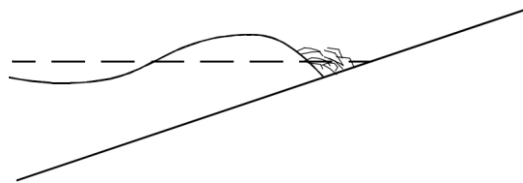


Figura 2.3 – Rebentação colapsante (“collapsing”) (USACE, 2006).

- Rebentação de fundo (“surging”) – ($\xi_0 > 3.5$) no caso da onda apresentar pouca declividade, esta espalha-se sobre o talude sem rebentar, são caracterizadas por terem uma forte reflexão (Figura 2.4).

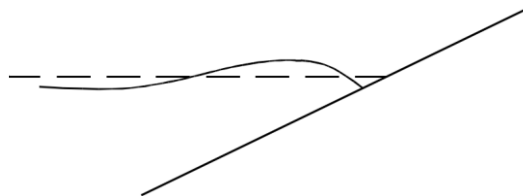


Figura 2.4 - Rebentação de fundo (“surging”) (USACE, 2006).

De notar que o Número de Iribarren não entra em linha de conta com o ângulo de incidência das ondas (β). Este corresponde ao ângulo formado entre a direcção de propagação das ondas e a direcção perpendicular à estrutura (Figura 2.5).

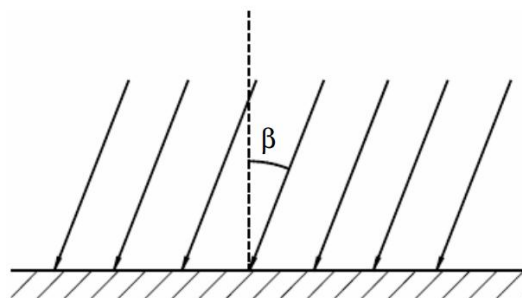


Figura 2.5 – Representação esquemática do ângulo de incidência das ondas (β) (Brito, 2007).

Verifica-se que quanto maior o ângulo de incidência das ondas menor o galgamento sobre a estrutura (Besley, 1999).

2.2.2 *Nível do Mar*

O nível do mar influencia fortemente o galgamento e depende da maré astronómica, das condições atmosféricas e, no caso da proximidade com rios, depende ainda do caudal do rio.

Para um mesmo estado de agitação marítima, se o nível da água for mais elevado o galgamento na estrutura vai ser superior. Tal deve-se à menor perda de energia da onda associada ao espraçamento sobre o talude da estrutura por, nestas condições, a distância entre o nível da água e o coroamento da estrutura ser menor.

Durante tempestades, em que o vento sopra com grande intensidade, pode dar origem a sobreelevações do nível do mar.

No caso da foz de um rio, elevados caudais escoados provocarão também uma subida no nível da água.

2.2.3 *Geometria da Estrutura*

A geometria da estrutura é preponderante tanto no controlo como na redução do galgamento. Deve, portanto, ser objecto de estudos pormenorizados para que a estrutura durante o seu funcionamento cumpra os objectivos para os quais foi dimensionada.

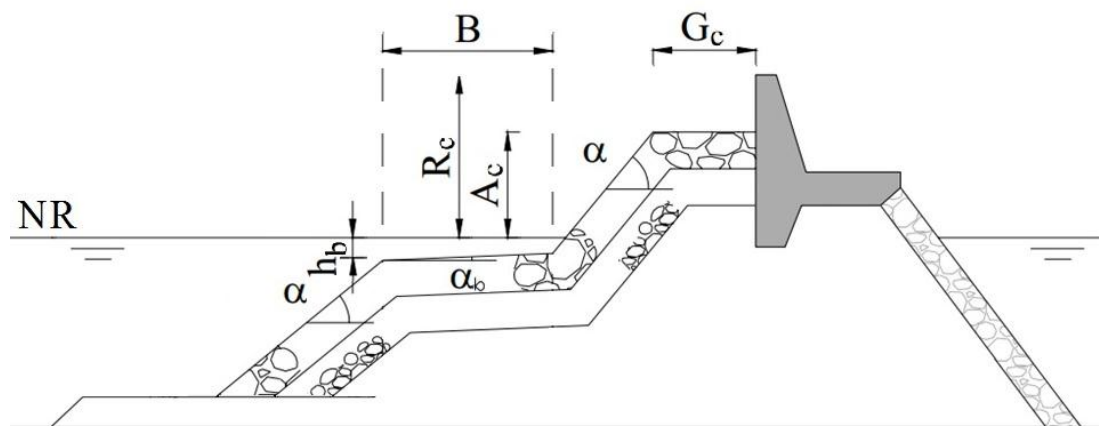


Figura 2.6 – Representação esquemática de alguns parâmetros que definem a geometria da estrutura e influenciam o galgamento, adaptada a partir de Coeveld et al. (2005).

Na definição da geometria da estrutura existem diversos parâmetros que a definem e influenciam o galgamento, tais como a permeabilidade, a rugosidade, a inclinação e configuração do talude da estrutura, da eventual berma, do coroamento e largura dos últimos dois elementos constituintes da estrutura.

Em primeiro lugar, na definição da geometria é necessário ter especial cuidado com o bordo livre, R_c , que representa a distância entre o coroamento da estrutura e o nível de repouso, NR (Figura 2.6).

Numa abordagem inicial, a solução mais vantajosa seria adotar estruturas com cotas de coroamento bastante elevadas de modo a reduzir os danos provocados pela ocorrência de galgamento. Porém, tal requer mais gastos, tanto com materiais, como com mão-de-obra, e estes custos acrescentados poderiam inviabilizar a estrutura do ponto de vista económico. Esta opção representaria também um impacto visual relevante, o que em zonas ambiental e turisticamente sensíveis poderia comprometer a sua viabilidade. Deste modo, a cota de coroamento é definida tendo em conta uma dada probabilidade de excedência e tendo em conta diversos factores de funcionamento da estrutura.

Uma das formas mais eficazes de reduzir o galgamento é dissipar a energia da onda incidente, tanto através da sua rebentação, como no seu espraiamento. Quanto maiores forem a rugosidade e a permeabilidade da estrutura maior será a perda de energia da onda incidente e conseqüentemente menor o caudal galgado. O aumento da rugosidade aumenta o atrito entre a superfície onda-estrutura contribuindo para uma perda mais acentuada de energia para uma mesma distância percorrida pela onda. Por outro lado, uma maior permeabilidade aumenta a capacidade de infiltração e percolação de água no manto(s) poroso(s) da estrutura reduzindo assim o caudal galgado.

Frequentemente recorre-se à utilização de uma berma de coroamento e/ou de uma berma no talude exterior como soluções de diminuição do galgamento. A primeira é caracterizada pela distância entre o meio da berma de coroamento e o nível da água, A_c , e pela sua largura, G_c , reduzindo o galgamento pelo aumento da distância até à zona abrigada da estrutura. A segunda é descrita pela sua profundidade, h_b , largura, B e inclinação, α_b , e uma vez que representa uma descontinuidade no perfil da estrutura, é relevante no aumentando da distância percorrida pela onda até ao coroamento da estrutura, promovendo a dissipação de energia na estrutura.

Por fim, o ângulo de inclinação do talude (α) influencia fortemente o fenómeno do galgamento alterando a geometria da onda e influenciando o modo como esta rebenta. Como já referido anteriormente, a influência de α é representada através do Número de Iribarren.

2.3 Formulações de Cálculo Empíricas

2.3.1 Introdução

As formulações empíricas para estimar o galgamento resultam de interpolações aos resultados obtidos em ensaios em modelos físicos, para um certo conjunto de estruturas e dadas condições de agitação. O caudal médio galgado é estimado por metro linear de estrutura, q , sendo expresso em $m^3/s/m$.

Em geral, o caudal médio galgado por unidade de comprimento da estrutura, q , é função dos seguintes parâmetros (USACE, 2006):

$$q = F(H_s, T_{0p}, \sigma, \beta, R_c, d_s, g, \text{parâmetros cracterísticos da geometria da estrutura})$$

H_s – altura de onda significativa;

T_{0p} – período da onda associado ao pico espectral ao largo (alternativamente T_{0m} – período médio ao largo);

σ – dispersão do espectro direccional;

β - ângulo de incidência das ondas;

R_c – bordo livre;

d_s – profundidade no pé da estrutura;

g – aceleração gravítica.

Nas formulações empíricas o caudal médio galgado é, normalmente, expresso por metro de estrutura e encontra-se adimensionalizado, Q , sendo calculado através de expressões do tipo das representadas por (2.5) ou (2.6).

$$Q = A \exp(-B R) \quad (2.5)$$

$$Q = A R^{-B} \quad (2.6)$$

em que A e B são coeficientes empíricos que dependem da geometria da estrutura e cujos valores estão tabelados, R corresponde ao bordo livre adimensionalizado. A forma de adimensionalizar o bordo livre varia consoante a formulação utilizada para calcular o galgamento.

Em seguida apresentam-se as formulações de Owen (1980) para estruturas permeáveis de talude simples e a metodologia actual presente no manual dos galgamentos – EurOtop (Pullen et al., 2007) para estruturas permeáveis de talude composto com berma (“Armoured Composite Slope with Crest Berm”), uma vez que estas são, para cada uma das formulações, as que mais se aproximam da geometria e especificidades da estrutura em estudo.

2.3.2 Formulação Empírica de Owen (1980)

Owen (1980) estudou, entre outros tipos, estruturas permeáveis de talude simples (Figura 2.7). Estas são constituídas por um núcleo e revestidas por material, colocado irregularmente, por forma a criar porosidade e conferindo permeabilidade à estrutura. O caudal médio galgado adimensionalizado por metro linear de estrutura, Q , é dado pela expressão (2.7) e é válida para $0.05 < R < 0.30$.

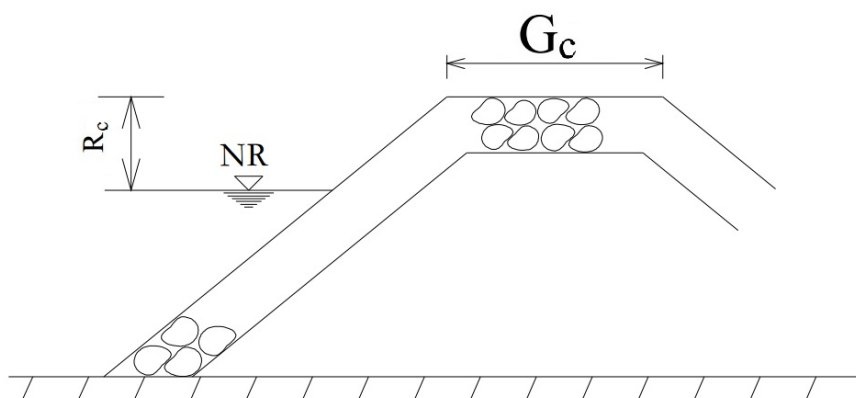


Figura 2.7 – Estruturas simples de talude permeáveis (adaptado de Brito, 2007).

$$Q = A \exp\left(-B \frac{R}{\gamma_f}\right) \quad (2.7)$$

em que R corresponde ao bordo livre adimensionalizado. Este depende das condições de agitação e do nível da água e é dado pela expressão (2.8), A e B são coeficientes empíricos aplicáveis a declives suaves (Tabela 2.1) e γ_f é o coeficiente de rugosidade (Tabela 2.2).

$$R = \frac{R_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \quad (2.8)$$

O caudal médio galgado por metro de estrutura, q, segundo Owen (1980), é dado pela expressão (2.9).

$$q = Q T_m g H_s \quad (2.9)$$

Tabela 2.1 – Coeficientes empíricos A e B para estruturas simples de talude, Owen (1980).

Declive do Talude	A	B
1:1.0	0.0079	20.1
1:1.5	0.0088	19.9
1:2.0	0.0094	21.6
1:2.5	0.0103	24.5
1:3.0	0.0109	28.7
1:3.5	0.0112	34.1
1:4.0	0.0116	41.0
1:4.5	0.0120	47.7
1:5.0	0.0131	55.6

Tabela 2.2 – Coeficientes de rugosidade. Adaptado de Besley (1999).

Tipo de estrutura	Coeficiente de rugosidade
Liso de betão ou asfalto	1.00
Blocos de betão com ou sem drenagem	1.00
Enrocamento, empedrado	0.95
Por degraus	0.95
Relvado/ com vegetação	0.90~1.00
Uma camada de enrocamento sobre uma base impermeável	0.80
Uma camada de enrocamento sobre uma base permeável	0.55~0.60
Duas camadas de enrocamento	0.50~0.55

Para que a estimativa do caudal médio galgado tenha em conta a largura da berma do coroamento, G_c , então a estimativa do valor de caudal, q , obtida através da expressão (2.9) deve ser multiplicada pelo coeficiente C_r determinado por (2.10).

$$C_r = 3.06 \exp(-1.5 G_c/H_s) \quad (2.10)$$

sendo G_c a largura da berma do coroamento permeável. Quando se verificar $G_c/H_s < 0.75$ deve considerar-se $C_r = 1$.

2.3.3 Metodologia do “Actual Manual dos Galgamentos” – EurOtop (Pullen et al., 2007)

No “actual manual dos galgamentos” – EurOtop Pullen et al. (2007) – o caudal médio galgado é estimado através de expressões do tipo da expressão (2.5). Os coeficientes A e B da expressão referida tomam diferentes formas consoante as especificidades da estrutura. O caudal médio galgado, q , é adimensionalizado, Q , pela expressão (2.11) e o bordo livre, R_c , é adimensionalizado pela expressão (2.12).

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \quad (2.11)$$

$$R = \frac{R_c}{H_{m0}} \quad (2.12)$$

No presente estudo, por se tratar do caudal médio galgado previsto para as medições a realizar em protótipo (Didier et al., 2011), recorreu-se à expressão (2.13) - Pullen et al. (2007).

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0} Y_f Y_\beta}\right) \quad (2.13)$$

A expressão utilizada corresponde a um quebra-mar com talude composto com uma berma permeável de coroamento, pois é aquela que mais se aproxima do caso de estudo. A influência da berma de coroamento no caudal médio galgado, q , é considerada do mesmo modo que na formulação de Owen (1980) – expressão (2.10).

A expressão (2.13), tal como a formulação de Owen (1980), tem limitações na sua aplicabilidade. Só é válida se R (expressão (2.12)) estiver no intervalo 0.3-2.0. A outra limitação relaciona-se com o produto dos factores de redução em que é imposto um limite mínimo de 0.5 (Reis et al., 2008a).

No caso da ondulação ser perpendicular à estrutura, $\gamma_\beta = 1$, uma vez que β é igual a zero. No presente estudo, admite-se que a ondulação incidente é perpendicular à estrutura por ser o caso mais desfavorável no fenómeno do galgamento. No caso de se considerarem outros ângulos de incidência, o factor γ_β tomaria valores no intervalo 0-1 de acordo com as expressões presentes em Pullen et al. (2007). Apresentam-se na Tabela 2.3 os valores do coeficiente de redução devido à rugosidade/permeabilidade, γ_f , sugeridos em Pullen et al. (2007).

Tabela 2.3 – Valores do coeficiente de rugosidade/permeabilidade, γ_f , para estruturas com manto permeável e com 1:1.5 de declive do talude, os valores a itálico são estimados/extrapolados – adaptado Pullen et al. (2007).

Tipo de material da camada	γ_f
Superfície lisa e impermeável	1.00
Enrocamento (1 camada, núcleo impermeável)	0.60
Enrocamento (1 camada, núcleo permeável)	0.45
Enrocamento (2 camadas, núcleo impermeável)	0.55
Enrocamento (2 camadas, núcleo permeável)	0.40
Cubos (1 camada, dispostos aleatoriamente)	0.50
Cubos (2 camadas, dispostos aleatoriamente)	0.47
Cubos Antifer	0.47
HARO's	0.47
Acrópodes™	0.46
Xblock®	0.45
CORE-LOC®	0.44
Tetrápodos	0.38
<i>Dolos</i>	<i>0.43</i>

Para a utilização desta metodologia recorreu-se às ferramentas computacionais que foram desenvolvidas no âmbito do projecto Europeu CLASH e que se encontram disponíveis “on-line” (http://www.overtopping-manual.com/calculation_tool.html) (Pullen et al., 2007).

2.4 Redes Neurais

As redes neuronais constituem um outro modo de estimar o caudal médio galgado para diferentes tipos de estruturas, apresentando também parâmetros que indicam a incerteza dos resultados. Os pormenores sobre a metodologia utilizada no desenvolvimento do modo de previsão do galgamento são descritos em Pozueta et al. (2004) e Van Gent et al. (2004).

A ferramenta NN_OVERTOPPING2, que se baseia na análise de 700 redes neuronais, foi desenvolvida por DELFT HYDRAULICS. Resultou do projecto internacional financiado pela União

Europeia acima referido, denominado CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping). As previsões baseadas no sistema de redes neuronais podem ser utilizadas na concepção de estruturas costeiras. No entanto, os resultados não devem ser utilizados na fase final de projecto, aconselhando-se a verificação dos resultados obtidos através de modelo físico. As redes neuronais basearam-se numa série de testes em modelo físico para um conjunto de estruturas e condições de agitação limitados, tal como foi mencionado anteriormente, o que faz com que as previsões tenham sido, de certo modo, afectadas tanto por efeitos de escala, como efeitos do modelo, erros de precisão devido à instrumentação utilizada nas medições e devidos à técnica de geração da ondas e ainda alguma inconsistência no conjunto de dados. Apesar das previsões serem acompanhadas por estatísticas que quantificam a incerteza, não contabilizam a totalidade dos efeitos mencionados anteriormente.

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 pode ser obtida de – <http://www.overtopping-manual.com/download/D41genericpredictionmethod2008.zip> – ou ser utilizada “on-line”– <http://nn-overtopping.deltares.nl/> – (Coeveld et al., 2005).

As redes neuronais artificiais representam um campo da inteligência artificial e, neste contexto, estas podem-se definir como sistemas que simulam a inteligência através da tentativa de reproduzir a estrutura do cérebro humano. Estas redes encontram-se organizadas sob a forma de camadas (“Layers”) com um ou mais elementos de processamento chamados “neurónios”. A primeira camada é denominada por camada de entrada (“input layer”), tendo tantos neurónios quantos os parâmetros de entrada, e a camada de saída (“output layer”) tem o número de neurónios correspondente ao número de parâmetros a prever. As camadas intermédias são camadas ocultas (“hidden layers”). No caso das redes neuronais desenvolvidas para estimar o galgamento com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 a camada de entrada é constituída por 15 parâmetros e tem como principal variável de saída o caudal médio galgado por metro linear de estrutura, q (Figura 2.8).

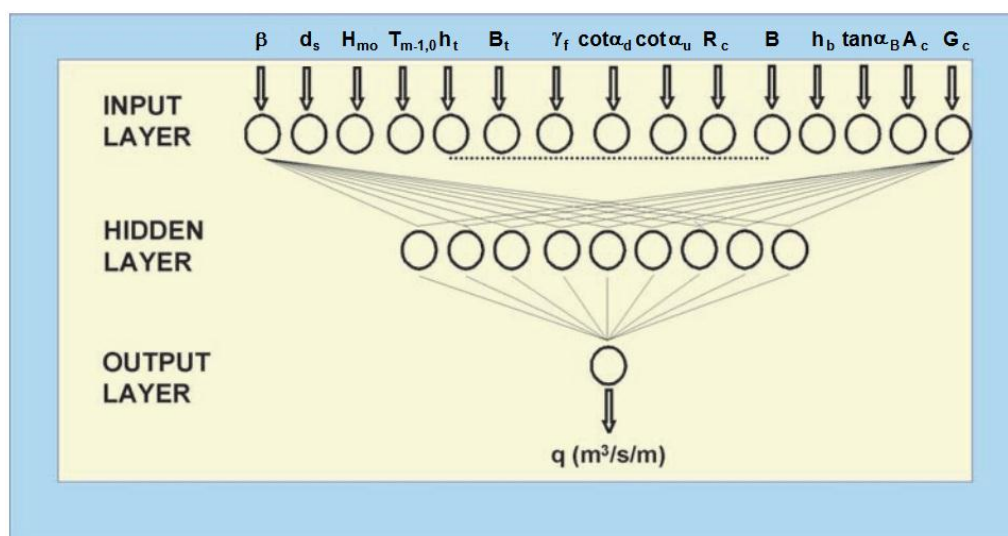


Figura 2.8 – Configuração da rede neuronal artificial do galgamento, em três camadas (adaptada de Pullen et al., 2007).

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 tem com principal vantagem a facilidade de utilização e obtenção de resultados, dispensando um conhecimento aprofundado em redes neuronais para a sua utilização. Para fornecer os dados de entrada é necessário criar um ficheiro Excel ou ASCII. Ao correr o programa é apresentada a camada de saída com os resultados do caudal médio galgado. Tem ainda como vantagens as que se apresentam em seguida:

- Funciona com quase todas as geometrias da estrutura;
- Facilidade em calcular variantes quer na geometria da estrutura, quer nas condições de agitação, obtendo os vários resultados, em vez de ter apenas uma resposta para cada utilização das redes.

Na Figura 2.9 apresentam-se os 15 parâmetros de entrada da NN_OVERTOPPING2 [H_{m0} , $T_{m-1,0}$, β , d_s , h_t , B_t , γ_f , $\cot \alpha_d$, $\cot \alpha_u$, B , h_b , $\tan \alpha_b$, R_c , A_c , G_c].

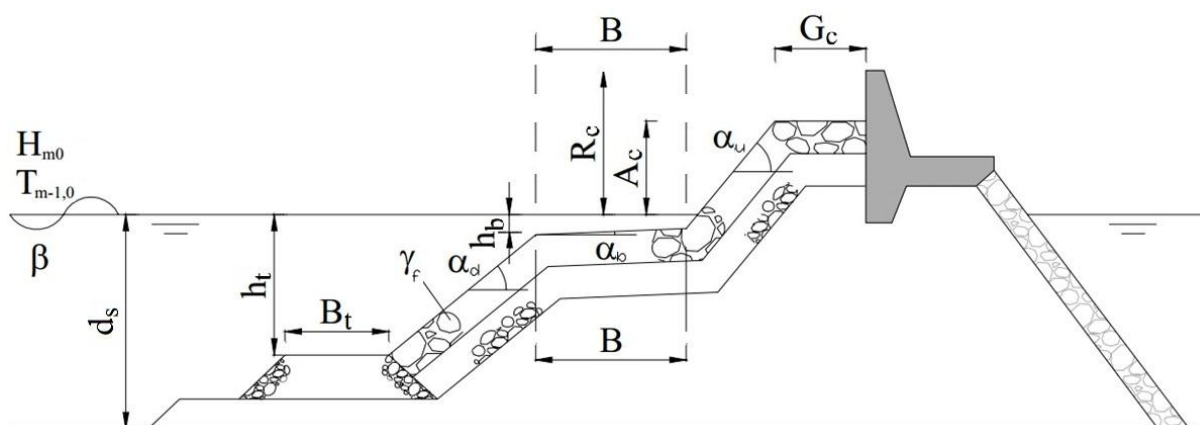


Figura 2.9 – Representação dos parâmetros intervenientes na definição da NN_OVERTOPPING2 em estudo (Coeveld et al., 2005).

Os parâmetros de entrada (“input”) subdividem-se da seguinte forma:

- Três parâmetros hidráulicos [H_{m0} , $T_{m-1,0}$, β]
- Onze parâmetros estruturais mostrados agrupadamente do seguinte modo: pé da estrutura [d_s , h_t , B_t], declives [$\cot \alpha_d$, $\cot \alpha_u$], berma [B , h_b , $\tan \alpha_b$], coroaamento [R_c , A_c , G_c] e por fim o factor de rugosidade/Permeabilidade [γ_f] da estrutura, apresentados pela ordem indicada (Coeveld et al., 2005).

Caso não exista informação sobre as características da onda no pé da estrutura, o cálculo dos parâmetros hidráulicos poderá ser feito com recurso a modelos de simulação de propagação da agitação marítima desde o largo até junto à costa.

Se apenas for conhecida a altura de onda significativa, H_s , proveniente da análise temporal, o parâmetro H_{m0} pode ser determinado através da relação presente em Battjes & Groenendijk (2000). No caso de apenas existir a informação sobre o período de pico, T_p , as restantes estimativas do

período de onda podem ser obtidas, para espectro unidimensionais do tipo JONSWAP, com recurso às formulações presentes na literatura (Coeveld et al., 2005) (expressões (2.14), (2.15) e (2.16)).

$$T_p \approx 1.05 T_{1/3} \quad (2.14)$$

$$T_p = 1.2 T_m \quad (2.15)$$

$$T_{m-1,0} \approx \frac{T_p}{1.1} \quad (2.16)$$

Seguidamente, apresentam-se os parâmetros de entrada seguindo de perto Coeveld et al. (2005) e Brito (2007):

- H_{m0} [m]: Altura significativa, calculada com o momento espectral m_0 , na frente da estrutura;
- $T_{m-1,0}$ [s]: Período médio, calculado com os momentos espectrais m_{-1} e m_0 , na frente da estrutura. Por vezes este parâmetro não é directo, podendo relacionar-se com o período de pico (T_p) através da expressão (2.16);
- B [°]: Ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a normal à estrutura;
- d_s [m]: Altura de água junto à estrutura, mais precisamente, a altura de água imediatamente a montante da estrutura;
- h_t [m], B_t [m]: Estes parâmetros dizem respeito à profundidade e à largura da banquetta de fundo da estrutura, respectivamente. Se não existir banquetta de fundo, $h_t = d_s$ e B_t é igual a zero;
- $\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-]: Estes parâmetros são usados para descrever o(s) declive(s) da estrutura. O fundo e o coroamento da estrutura já são descritos em outros parâmetros, portanto eles não são incluídos nestes dois parâmetros. $\cot \alpha_d$ e $\cot \alpha_u$ são as co-tangentes das inclinações na área de centro da estrutura sob ($\cot \alpha_d$ inferior – “down”) e acima ($\cot \alpha_u$ superior – “up”) da berma, respectivamente. A divisão das partes da estrutura encontra-se representada na Figura 2.10 e descrita no manual das redes neuronais (Coeveld et al., 2005);
- B [m], h_b [m], $\tan \alpha_b$ [-]: Estes parâmetros descrevem a berma da estrutura. B é a largura, medida horizontalmente, h_b é a profundidade de água na berma, medido no centro da mesma. Se a berma estiver acima do nível de água, h_b é negativo. E no caso de ser horizontal, $\tan \alpha_b = 0$.

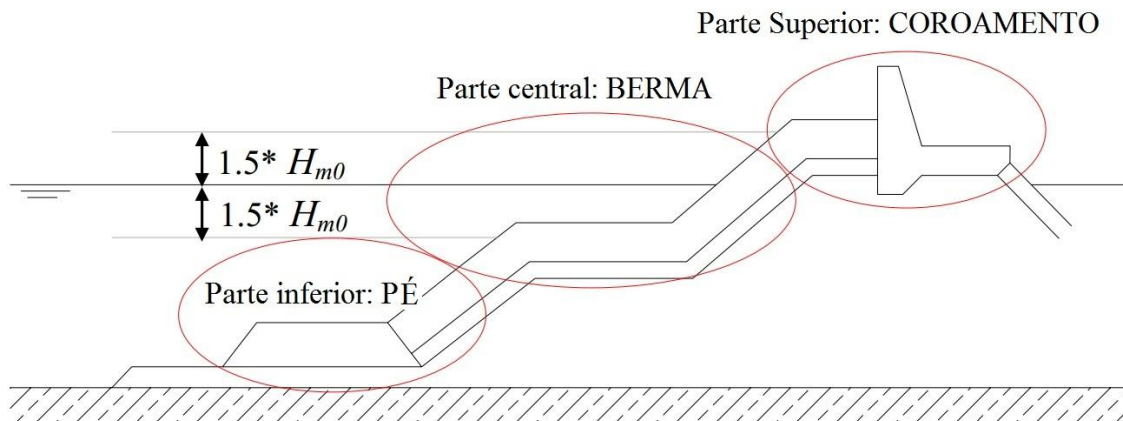


Figura 2.10 – Partes da estrutura costeira, adaptado (Coeveld et al., 2005).

- R_c [m], A_c [m], G_c [m]: Estes parâmetros descrevem o coroamento da estrutura. R_c é o bordo livre, tal como referido anteriormente. A_c , isto é, a distância entre o meio da berma de coroamento e o nível da água. G_c é a largura de coroamento. No caso de o coroamento ser construído na estrutura então G_c é a largura dos blocos em frente ao elemento do coroamento.
- γ_f [-]: Este parâmetro dá uma indicação da rugosidade e da permeabilidade da estrutura. Quanto maior a rugosidade e permeabilidade da estrutura menor será o caudal galgado e maior será a energia dissipada na superfície da estrutura, conseqüentemente este parâmetro tomará valores inferiores. Na Tabela 2.4 indicam-se alguns valores de γ_f para alguns tipos de revestimento do manto. Para o caso de diques com diferentes camadas superiores o valor deste parâmetro deve ser consultado no TAW (2002).

Tabela 2.4 – Valores do coeficiente rugosidade/permeabilidade, para alguns tipos de materiais constituintes da camada (Coeveld et al., 2005).

Tipo de material da camada	γ_f
Superfície lisa e impermeável	1.00
Rocha	0.50
Cubos (2 camada, dispostos aleatoriamente)	0.50
Cubos (1 camada, dispostos aleatoriamente)	0.52
Cubos Antifer	0.50
Acrópodes™	0.49
Xblock®	0.49
CORE-LOC®	0.47
HARO's	0.47
Tetrápodos	0.40
Dolosse	0.43

Como parâmetros de saída a NN_OVERTOPPING2 estima o caudal médio galgado por metro linear de estrutura, q , e indica também os percentis de diversas ordens: $q_{2.5\%}$, $q_{5\%}$, $q_{25\%}$, $q_{50\%}$, $q_{75\%}$, $q_{95\%}$ e $q_{97.5\%}$. O intervalo de confiança a 95% é calculado pelos quantis $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$.

2.5 Modelação Numérica

Recentemente, e devido à melhoria da capacidade de cálculo dos computadores, os modelos numéricos têm sido fortemente desenvolvidos tornando-se cada vez mais potentes e atractivos, por constituírem um ferramenta de custo substancialmente inferior que a modelação física. Após a validação dos modelos, estes apresentam grande flexibilidade tanto nas condições de agitação, como de geometria das estruturas em estudo. Porém, para que as simulações realizadas sejam realistas, os modelos devem ser capazes de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficiente para gerar resultados consistentes (Reis & Neves, 2010).

No âmbito do estudo da interacção entre a agitação marítima e as obras marítimas, destacam-se os modelos baseados na teoria da onda em condições de água pouco profunda, NLSW (“NonLinear Shallow Water”) (e.g., Van Gent, 1994; Hu & Meyer, 2005), os modelos RANS (“Reynolds Average Navier-Stokes”) (e.g., Lin & Liu, 1998; Losada et al., 2008) e os modelos SPH (“Smoothed Particle Hydrodynamics”) (e.g., Dalrymple & Rogers, 2006; Didier & Neves, 2009).

A aplicação dos modelos mais recentes (RANS e SPH) e também mais completos têm algumas limitações na prática da Engenharia uma vez que usualmente o tempo de projecto é reduzido e estes têm um elevado tempo de cálculo e carecem de calibração de determinadas características estruturais para cada caso de estudo, como por exemplo a porosidade (Neves et al., 2008).

O modelo numérico IH-2VOF (Losada et al., 2008) é baseado nas equações RANS e descreve o escoamento no interior e no exterior de estruturas permeáveis. Este modelo foi já aplicado a casos de estudo de galgamento em quebra-mares de talude à escala de protótipo, com bons resultados (Losada et al., 2008, García, 2007 e Mariz et al., 2012).

Tal como já foi referido, os modelos NLSW são mais simples. Todavia, apresentam algumas limitações fundamentalmente relacionadas com as equações de base que apesar de simplificadas, possibilitam simulações realistas e rápidas (e.g., Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Clarke et al., 2004). São utilizados em dimensionamento de estruturas marítimas galgáveis e na previsão de inundações, uma vez que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas. Estes modelos têm sido validados essencialmente para estruturas impermeáveis (e.g., Dodd, 1998; Hu et al., 2000) e para praias permeáveis (e.g., Van Gent, 1996; Clarke et al., 2004), não tendo sido ainda validados sistematicamente para o estudo do galgamento de estruturas marítimas porosas (Reis & Neves, 2010).

Neste estudo utilizou-se o modelo AMAZON (Hu, 2000), que irá ser descrito com mais pormenor no capítulo 3. O modelo referido utiliza as equações NLSW e permite modelar apenas uma camada

porosa. Dado que não foi possível obter medições de campo do galgamento, recorreu-se ao modelo IH2-VOF (Losada et al., 2008) para ajustar os parâmetros intervenientes nas equações de escoamento na camada porosa. Este apresenta uma maior complexidade, tanto na descrição e modelação do fenómeno do galgamento, como na discretização de várias camadas porosas (Mariz et al., 2012).

3 MODELO NUMÉRICO AMAZON

O modelo AMAZON (Hu, 2000) foi utilizado com o propósito de aprofundar o conhecimento do fenómeno do galgamento do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, sob o ponto de vista de caudais médios galgados.

O AMAZON, na sua versão original, foi desenvolvido em Manchester Metropolitan University utilizando a linguagem de programação C++ para o estudo de estruturas em talude impermeáveis, embora permitisse a consideração do efeito poroso através de um recurso a uma dissipação artificial de energia, recorrendo a um parâmetro de atrito de fundo (coeficiente de Chézy) (Hu, 2000). Verificou-se, através dos resultados obtidos, que este artifício não era eficiente na modelação da porosidade por ter uma influência muito reduzida no caso dos meios porosos se encontrarem submersos. Recorrendo ao coeficiente de Chézy não é possível simular convenientemente seu efeito em meios que não estão submersos ou a submersão se dá apenas numa fina camada de água e apenas num curto espaço de tempo (Neves et al., 2008).

Este modelo tem vindo a ser desenvolvido, desde 2007, pelo LNEC (Reis et al., 2008b, 2009a, 2009b, 2011 e Reis & Neves 2010) em colaboração com o autor. O desenvolvimento da nova versão passou pela inserção de uma única camada porosa com porosidade constante. Deste modo, para estruturas com mais de uma camada porosa e/ou com um núcleo com diferentes características, estas são representadas por uma estrutura permeável homogénea ou por uma estrutura permeável com núcleo impermeável. De modo a descrever o escoamento na camada porosa foram implementados no modelo as equações de Darcy e de Forchheimer, ambas apresentadas com mais detalhe à frente neste Capítulo.

O modelo em estudo já foi validado em diferentes casos de estudo com bons resultados (Hu et al., 2000) envolvendo escoamentos permanentes e não permanentes, viscosos e não-viscosos e ainda subcríticos e supercríticos. Tem sido também validado e extensivamente utilizado no estudo do galgamento de estruturas impermeáveis (e.g., Neves et al., 2010). No entanto, em estruturas permeáveis o modelo ainda não foi objecto de uma validação sistemática, devido à versão original ter sido desenvolvida sem ter em conta, explicitamente, escoamento em meio poroso.

O objectivo final da colaboração acima indicada é aprimorar um modelo numérico que seja de fácil utilização e que represente um bom compromisso entre o tempo de cálculo e a precisão destes mesmos cálculos relativos ao galgamento.

Apresentam-se de seguida os dados de entrada do modelo, acompanhando de perto Reis & Neves (2010):

- Perfil da estrutura impermeável;
- Batimetria dos fundos adjacentes;

- Características da camada porosa: geometria, porosidade, diâmetro nominal do material constituinte e coeficientes de atrito;
- Parâmetro de atrito de fundo (pode variar ao longo da estrutura e da batimetria);
- Nível do mar, que pode ser variável;
- Agitação incidente: o modelo permite a escolha de ondas sinusoidais ou ondas irregulares definidas por um espectro empírico (e.g., JONSWAP, Pierson-Moskowitz), por um espectro definido pelo utilizador ou ainda a introdução de uma série incidente de elevação da superfície livre proveniente, por exemplo, de ensaios em modelo físico reduzido;
- Malha (uniforme/não uniforme, discretização);
- Outros parâmetros (e.g. altura de água mínima em cada célula da malha).

De referir ainda que este modelo é muito estável e robusto numericamente e, como foi referido, baseia-se nas equações não lineares da teoria de onda em condições de água pouco profunda (NLSW) que advêm de uma simplificação das equações de Reynolds por integração em profundidade, admitindo que o fluido, neste caso a água, é incompressível, isotrópico e Newtoniano.

No modelo AMAZON considera-se que a pressão é hidrostática, desprezando a aceleração vertical, uma vez que esta é bastante menor do que a aceleração horizontal. As equações são resolvidas por um método de volumes finitos. A implementação deste método no modelo possibilita a geração de uma malha que pode ter qualquer forma (e.g., rectangular, triangular e hexagonal) e dimensões variáveis, permitindo gerar uma malha mais refinada na zona de interesse do estudo e outra mais grosseira onde não seja necessário um cálculo mais preciso. A descrição detalhada do modelo pode ser consultada em Hu (2000).

O modelo permite ainda simular tanto ondas regulares como irregulares, quer na versão unidimensional (canal) – utilizada no presente estudo – como na versão bidimensional (em planta) e a rebentação é simulada com o conceito de macaréu (“tidal bore”) (Hu, 2000).

Na fronteira de entrada do modelo, o AMAZON incorpora um método numérico de absorção de ondas que permite absorver mais de 98% das ondas reflectidas pela estrutura. Tal permite colocar a fronteira de entrada próxima da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, dado basear-se na resolução das equações NLSW. Segundo Hu & Meyer (2005) e para optimização dos resultados, a fronteira de entrada deverá ser colocada a, aproximadamente, um comprimento de onda do pé da estrutura, L_s , dado pela expressão (3.1).

$$L_s = T_p \sqrt{g d_s} \quad (3.1)$$

em que, d_s é a profundidade no pé da estrutura, g a aceleração da gravidade e T_p o período de pico do espectro incidente.

Dado que o modelo se baseia em equações NSW deve verificar-se que as condições são de águas pouco profundas ($d_s < L/20$). É necessário ainda verificar-se se d/L_0 , sendo d a profundidade na fronteira de entrada do modelo, está compreendido no intervalo entre 0.016 e 0.19 (Pullen & Allsop, 2003).

O modelo contempla estruturas com várias configurações, como estruturas verticais (ou quase verticais) e em talude (com ou sem berma, com ou sem superestrutura). Porém, por ser um modelo integrado em profundidade, não permite modelar a parte deflectora de um muro-cortina e utiliza um artifício para representar estruturas verticais (Hu, 2000).

A equação de Darcy (3.2) é válida para escoamentos laminares em regime estacionário. No âmbito do estudo realizado no quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira será apenas utilizada à escala de modelo.

$$I = u/K \quad (3.2)$$

onde I é o gradiente hidráulico, u é a velocidade do escoamento na camada porosa (integrada na vertical) e K é a condutividade hidráulica (ou coeficiente de Darcy).

A equação de Forchheimer (3.3) (Losada et al., 2008) é válida para escoamentos turbulentos em regime estacionário.

$$I = a u + b u |u| \quad (3.3)$$

em que I é o gradiente hidráulico, u é a velocidade do escoamento na camada porosa integrada na vertical) e a e b são coeficientes considerados constantes no tempo e no espaço (expressões (3.4) e (3.5), respectivamente (CIRIA/CUR/CETMEF, 2007). Existem na literatura da especialidade diversas expressões de cálculo para estes coeficientes (e.g., García, 2007).

$$a = \alpha \frac{(1 - n^2) v}{n^3 g D^2} \quad (3.4)$$

$$b = \beta \frac{1 - n}{n^3} \frac{1}{g D^2} \quad (3.5)$$

Nestas fórmulas, D é o diâmetro nominal do material constituinte do manto, v é a viscosidade cinemática da água, n é a porosidade da camada porosa e α e β são os coeficientes de atrito linear e não linear, respectivamente. Estes dependem da forma da curva granulométrica do material da camada, do número de Reynolds e do número de Keulegan-Carpenter.

A passagem de água entre a camada superficial e a camada porosa é limitada pela velocidade máxima que o escoamento pode ter durante a transferência entre as duas camadas. A velocidade máxima de transferência é designada por IP (“interface permeability”). Assim sendo, cada célula na camada superficial tem uma célula correspondente na camada porosa e a transferência da água entre as duas é actualizada a cada passo de cálculo, como descrito em Reis & Neves (2010):

- Se a célula porosa não estiver preenchida e se a célula superficial correspondente estiver preenchida com água, há transferência de água da célula superficial para a célula porosa, limitada pelo valor de IP (Figura 3.1 a);
- Se a célula porosa estiver preenchida e a pressão da água na camada porosa for superior à da camada superficial, há transferência de água da célula porosa para a célula superficial correspondente, limitada pelo valor de IP (Figura 3.1 b).

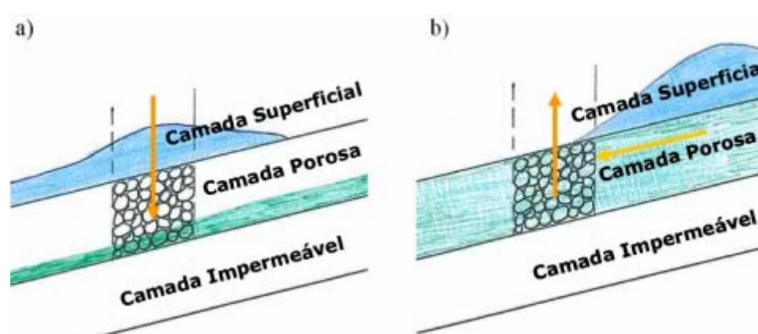


Figura 3.1 – Representação esquemática da transferência de água entre a camada porosa e a camada superficial no modelo AMAZON (Reis & Neves, 2010), a) com a célula de cálculo vazia ou parcialmente preenchida e b) com a célula de cálculo totalmente preenchida.

No modelo AMAZON admite-se que IP é um dado constante do modelo. Actualmente existem estudos que se debruçam sobre o valor para o IP (Reis et al., 2009a).

No caso de se recorrer à equação de Darcy, para descrever o escoamento na camada porosa, é necessário calibrar os parâmetros K e IP. Note-se que, alguns autores (e.g. Van Gent, 1994; Clarke et al., 2004) consideram o valor de I na interface entre as duas camadas inferior a 1. Tal corresponde a considerar $IP \leq K$ na equação de Darcy (3.2). Se, por outro lado, se utilizar a equação de Forchheimer, então é necessário calibrar os parâmetros IP, α e β . Segundo os autores acima citados, – o valor de I na interface entre as duas camadas inferior a 1 – corresponde a considerar a uma velocidade máxima de passagem, IP expressa por (3.6) (Reis et al., 2009a).

$$IP \leq \frac{-a + (a^2 + 4b)^{0.5}}{(2b)} \quad (3.6)$$

em que a e b se obtêm das expressões (3.4) e (3.5), respectivamente.

Tal como foi referido anteriormente, o modelo AMAZON pode ser aplicado quer à escala de modelo, quer de protótipo, sendo apenas necessário “escalar” adequadamente os dados e alguns parâmetros utilizados no modelo numérico. No presente estudo recorreu-se à semelhança de Froude ($Fr = v/\sqrt{gD}$) para “escalar” os dados e parâmetros de entrada do modelo.

O AMAZON permite obter séries temporais da superfície livre em diversos pontos do domínio, velocidades integradas na vertical e, através destas, a série temporal de caudais instantâneos e caudais médios de galgamento em vários pontos da estrutura.

4 CASO DE ESTUDO

No âmbito do projecto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve, foi escolhido o Porto de Pesca de Albufeira para a realização das campanhas de campo de observação.

O Porto de Pesca de Albufeira é protegido por duas obras marítimas em talude, que são designadas por quebra-mar Nascente e quebra-mar Poente (Figura 4.1), sendo o segundo objecto de estudo no presente trabalho. As obras de construção do porto tiveram início em 1999 e terminaram em 2002.



Figura 4.1 – Quebra-mares Nascente e Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

O quebra-mar Nascente é a principal obra de defesa contra a agitação do quadrante SE e tem cerca de 250m de comprimento. Apresenta, no troço do seu enraizamento, um alinhamento rectilíneo aproximadamente orientado N-S, inflectido depois para SSW-NNE na zona mais próxima da cabeça.

O quebra-mar Poente é a principal defesa do porto contra a agitação marítima proveniente do quadrante SW. Desenvolve-se numa extensão de cerca de 275m e tem estruturalmente 5 perfis-tipo (Figura 4.3).

A secção do quebra-mar a estudar, localizada no quebra-mar Poente, tem um talude exterior com um declive de 3:2 e desenvolve-se entre a cota +7.0m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5m (-4.0m (ZH)). O talude exterior é protegido por enrocamentos de 90 a 120kN dispostos em duas camadas, tendo como filtros duas camadas de enrocamentos de 10 a 30kN. A fundação do talude processa-se sobre um tapete de TOT com 0.5m de espessura (Figura 4.2). Quer a berma de coroamento exterior (à cota +7.0m (ZH)), quer a berma de coroamento interior (à cota +6.5m (ZH)),

têm cerca de 5.9m de largura. Na zona central do coroamento desenvolve-se um passadiço de betão com 3.0m de largura, coroamento à cota +6.5m (ZH) e fundação à cota +4.0m (ZH). O talude interior tem um declive de 3:2 e desenvolve-se entre a cota +6.5m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5m (-4.0m (ZH)). Na zona superior (a cima do zero hidrográfico), o talude interior é protegido por enrocamentos de 90 a 120kN dispostos em duas camadas, tendo como filtros duas camadas de enrocamentos de 5 a 10kN. Na zona inferior, o talude interior é protegido por enrocamentos 10 a 30kN, dispostos em duas camadas. A transição entre as partes superior e inferior do talude interior é feita através de uma berma à cota do zero hidrográfico revestida por enrocamentos de 5 a 10kN.

Na Figura 4.3 apresenta-se a planta do porto com a indicação da secção em estudo, cujo perfil corresponde ao perfil tipo 3 (Figura 4.2).

É de referir que os blocos rochosos do manto resistente apresentam uma extrema arrumação, o que do ponto de vista do galgamento nem sempre é recomendado em obras marítimas desta tipologia.

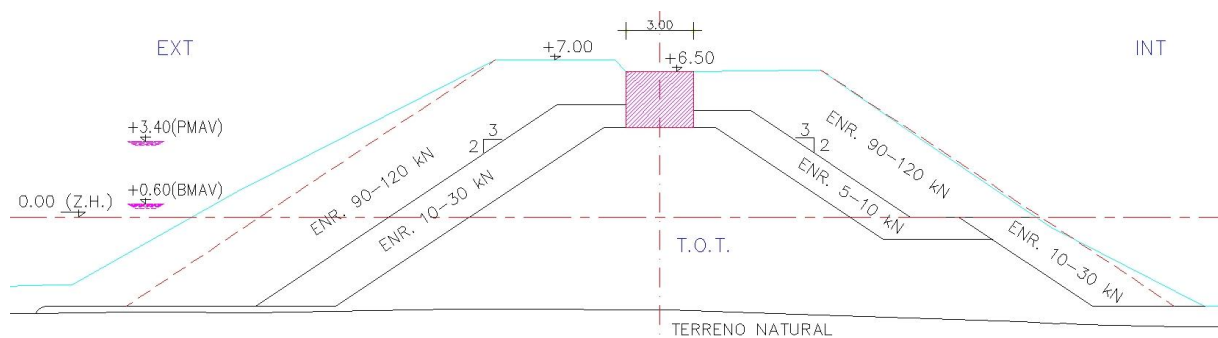


Figura 4.2 – Perfil do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

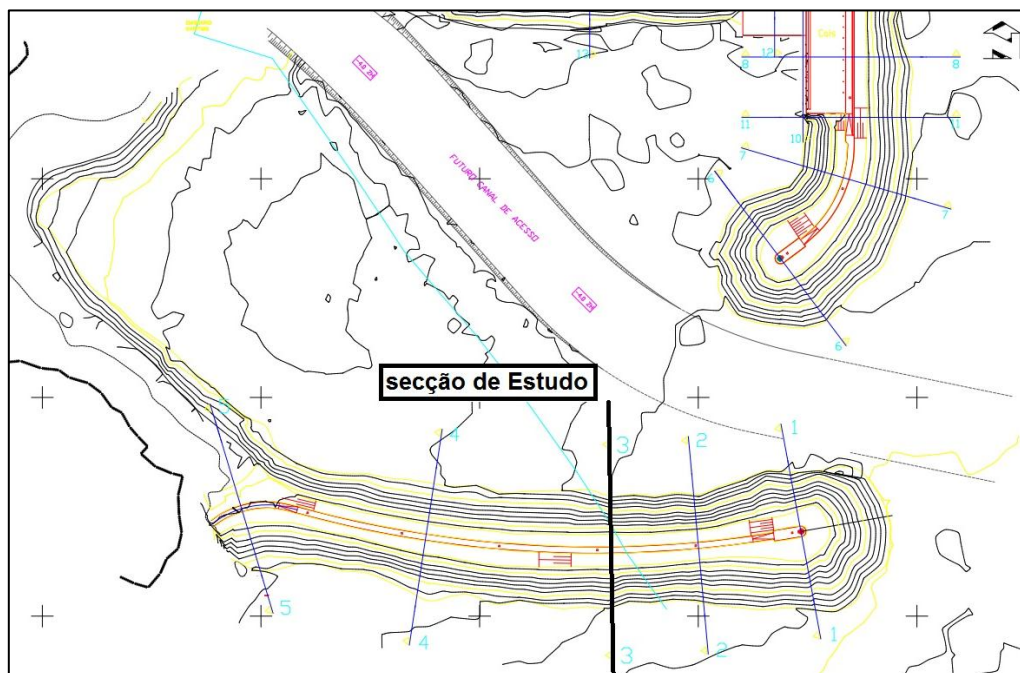


Figura 4.3 – Planta do porto de pesca e dos dois quebra-mares, Nascente e Poente. A secção de estudo para a campanha de campo está indicada no quebra-mar Poente.

Estava planeada para o Inverno 2011/2012 uma campanha de campo neste molhe (Figura 4.4), que permitiria determinar quer o caudal galgado, quer a agitação que incide na estrutura (Didier et al., 2011).

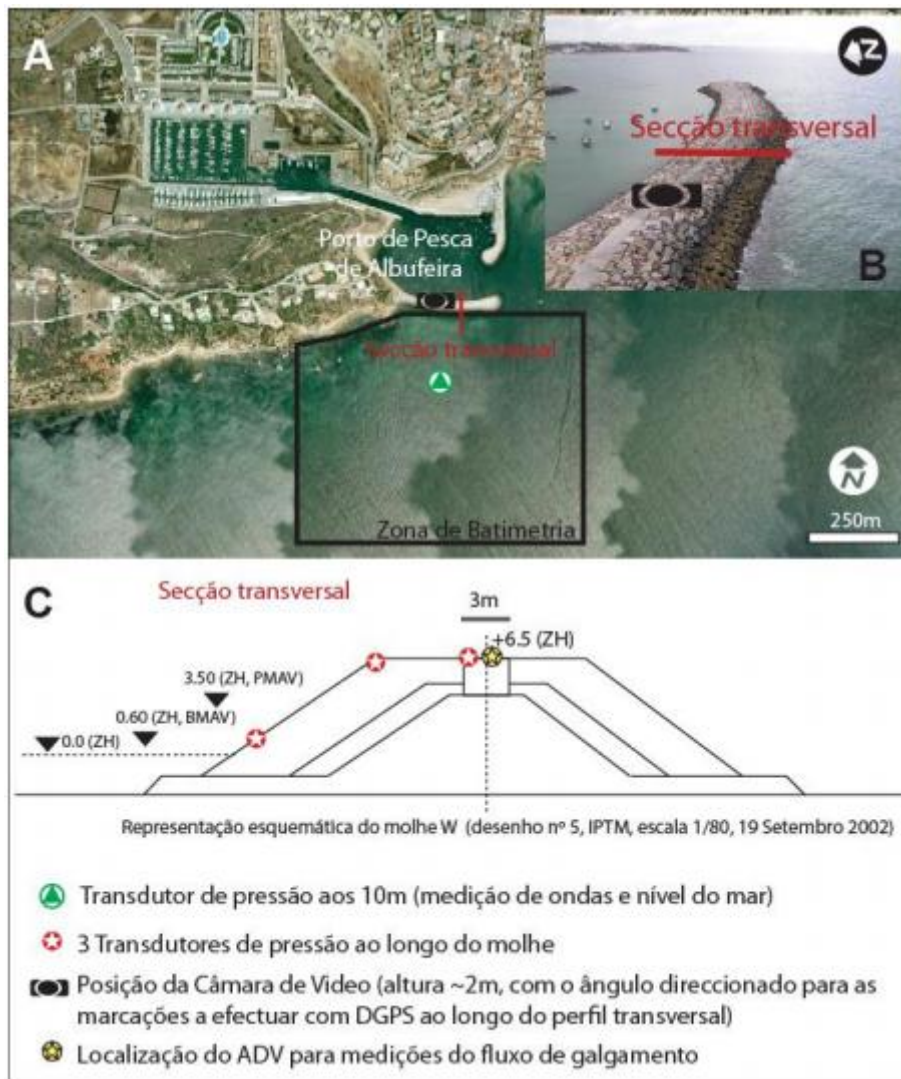


Figura 4.4 – (A) Imagem da área do Porto de Pesca de Albufeira (adaptada do Google Earth, 2006) com indicação da zona onde serão realizados os trabalhos de batimetria, localização da câmara de vídeo e transdutor de pressão aos ~10m de profundidade; (B) Quebra-mar Poente do Porto de Albufeira onde decorrerão as campanhas de campo com indicação da secção a estudar; (C) Representação esquemática da secção do quebra-mar e posicionamento dos equipamentos (PTs e ADV) (Didier et al., 2011).

Tendo em conta as condições locais de batimetria, nível de maré e agitação marítima e ainda as características do perfil da secção de estudo do quebra-mar Poente do Porto de Albufeira, foram realizados cálculos preliminares dos caudais médios de galgamento, com base em ferramentas empíricas, com o intuito de melhor definir as condições para as quais se deveriam realizar as campanhas de campo (Didier et al., 2011).

Anteriormente à realização das campanhas de colheita de dados de galgamento foi efectuado o levantamento batimétrico da área adjacente ao quebra-mar, até profundidades da ordem dos 15-20m (Figura 4.4 B)

Está previsto que, durante as campanhas sejam obtidos dados de elevação do nível do mar (ondas e nível de água) a cerca de 10m de profundidade (Figura 4.4 B), na base da estrutura (próximo da rebentação) e no coroamento da estrutura (área de galgamento, Figura 4.4 C). Estes dados serão obtidos com transdutores de pressão (PT) colocados junto ao fundo. Serão, ainda, adquiridos dados de perfil de corrente de galgamento no topo da estrutura, através da montagem de um Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Complementarmente será colocada uma câmara vídeo numa estrutura fixa no topo do quebra-mar para a medição da velocidade da frente de galgamento entre marcas colocadas transversalmente ao quebra-mar. As marcas serão georreferenciadas com recurso a um GPS diferencial (DGPS). Obter-se-ão, assim, dados de elevação e de velocidade de fluxo de galgamento sobre a estrutura, que permitirão inferir o caudal de galgamento.

Para a caracterização das ondas que geram o galgamento seriam comparados os dados provenientes de dois métodos: (1) dados de onda (não direccionais) adquiridos a cerca de 10m de profundidade (PT colocado na base do quebra-mar, no âmbito deste trabalho); (2) propagação para a zona costeira de dados de agitação medidos ao largo. Para este segundo método foi efectuado um levantamento batimétrico da área adjacente ao quebra-mar até profundidades da ordem dos 15-20m.

Tal como foi dito anteriormente, no Inverno 2011/2012 não se verificou a conjugação de elevados níveis de maré com forte agitação marítima, o que levou a que não fosse possível medir galgamento na estrutura.

5 CÁLCULO E COMPARAÇÃO DOS CAUDAIS MÉDIOS GALGADOS

5.1 Enquadramento

De modo a possibilitar o cálculo dos caudais médios galgados com o modelo numérico AMAZON, realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, seleccionando-se um caso base caracterizado por uma altura de onda $H=4\text{m}$ e um nível de maré de $+3.5\text{m}$ (ZH). Este nível corresponde, aproximadamente, ao nível de preia-mar de águas vivas (PMAV) em Albufeira, de acordo com a Tabela de Marés de 2011 do Instituto Hidrográfico.

Para a análise de sensibilidade utilizou-se agitação marítima incidente regular, tanto à escala do protótipo, como do modelo (1:30). A modelação numérica com ondas regulares é mais rápida, não só porque a geração de ondas é mais simples, mas também por serem necessárias menos ondas por simulação, cerca de 100 considerando os períodos típicos da costa de Portugal. Este número de ondas permite simular todas as sobreposições possíveis entre a onda incidente e a onda reflectida. Nas simulações do modelo com agitação irregular, realizadas neste estudo após o ajuste dos parâmetros do modelo, são necessárias cerca de 1000 ondas para garantir que a simulação abrange as maiores ondas de um espectro, que são as que mais contribuem para o galgamento.

Inicialmente, a análise de sensibilidade foi efectuada à escala do protótipo para um período de onda $T=10\text{s}$, recorrendo à equação de Forchheimer. Como o AMAZON só permite a utilização de uma camada porosa no modelo, a estrutura foi representada considerando duas situações: apenas o manto principal como camada porosa (designada por opção A - Figura 5.1) e incluindo também os filtros (designada por opção B - Figura 5.1). Em seguida, a análise de sensibilidade foi efectuada para um período $T=12\text{s}$ para a opção A - Figura 5.1 – e utilizando a equação de Forchheimer.

A análise de sensibilidade incluiu também a estrutura à escala 1:30 apenas para o período correspondente a $T=12\text{s}$ (opção A - Figura 5.1). Efectuaram-se simulações para quatro combinações de parâmetros de entrada utilizando a equação de Forchheimer. Recorrendo à equação de Darcy, ensaiou-se também a estrutura à escala 1:30, procurando compreender a importância da turbulência na camada porosa. Representou-se, por fim, a estrutura no AMAZON como sendo toda impermeável, de modo a obter o limite superior para o caudal médio galgado.

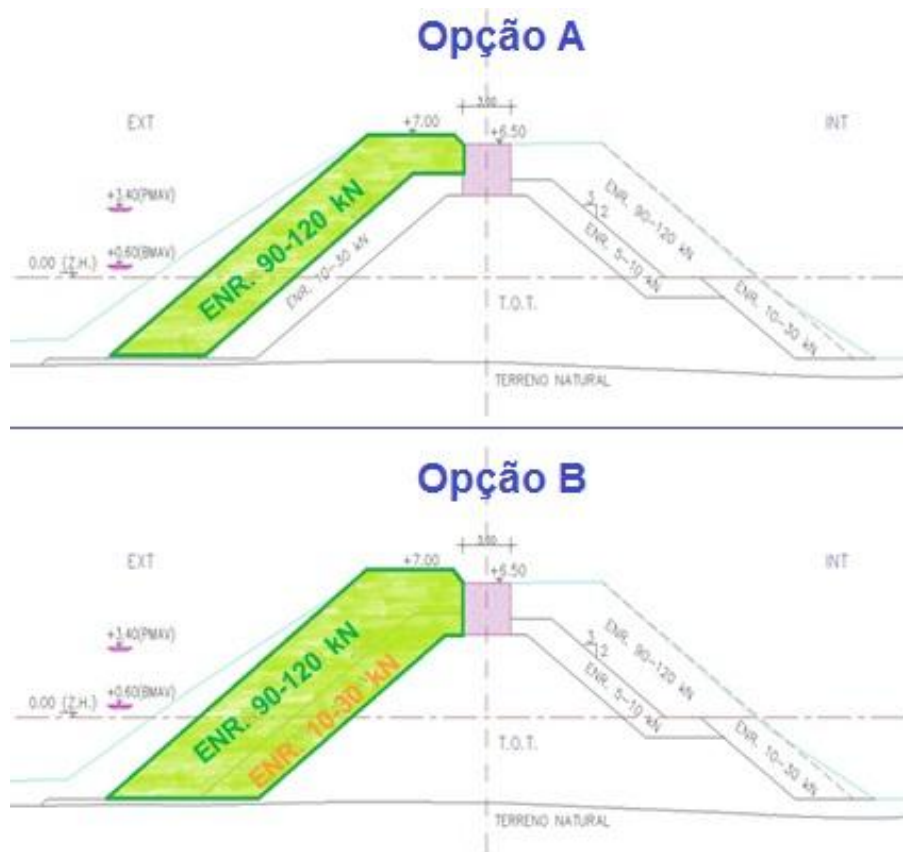


Figura 5.1 – Representação das camadas porosas da estrutura no modelo numérico para as opções A e B.

Após a análise de sensibilidade apresentam-se os resultados com agitação irregular para períodos de onda $T_p = 10s$ e $12s$ e alturas de onda $H_s = 4m, 3m, 2m$ e $1m$, em protótipo (opção A - Figura 5.1). Utilizaram-se, neste caso, os parâmetros ajustados de acordo com a sugestão presente em Mariz et al. (2012), cujo ajuste foi efectuado por comparação com resultados obtidos com o modelo IH-2VOF (Mariz et al., 2012). O ajuste dos parâmetros consistiu numa solução de recurso para permitir a comparação de resultados entre as várias ferramentas de cálculo, devido a não ter sido possível a calibração do modelo numérico AMAZON através de dados de campo pelas razões apresentadas no Capítulo 4.

Posteriormente, introduzem-se os resultados recorrendo às formulações empíricas e ferramenta neuronal, quer à escala do protótipo, quer do modelo, também para períodos de onda $T_p = 10s$ e $12s$ e alturas de onda $H_s = 4m, 3m, 2m$ e $1m$.

Por fim, e apenas em protótipo, é feita uma comparação entre os resultados do modelo AMAZON, e os das várias ferramentas de cálculo empíricas.

5.2 Modelo Numérico AMAZON

5.2.1 Análise de sensibilidade com agitação regular

5.2.1.1 Protótipo

Uma vez que o modelo AMAZON se baseia nas equações não lineares de água pouco profunda, é necessário garantir essa condição. Para tal, e através da teoria linear das ondas, estimou-se o comprimento de onda (L) no pé da estrutura na secção em análise onde a profundidade é $d_s = 7.82\text{m}$:

- $L_{T=10s} = 82.96\text{m} \rightarrow \text{Águas intermédias pois } 4.15\text{m} = L/20 < 7.82\text{m} < L_0/2 = 78.07\text{m};$
- $L_{T=12s} = 101.24\text{m} \rightarrow \text{Águas intermédias pois } 5.06\text{m} = L/20 < 7.82\text{m} < L_0/2 = 112.42\text{m}.$

Verificou-se ainda:

- $(d/L_0)_{T=10s} = 0.06;$
- $(d/L_0)_{T=12s} = 0.04;$

sendo d a profundidade na fronteira de entrada do modelo ($d = 9.05\text{m}$) e L_0 o comprimento de onda em águas profundas ($L_{0\ T=10s} = 156.13\text{m}$ e $L_{0\ T=12s} = 224.83\text{m}$).

Para ambos os períodos, os valores obtidos de d/L_0 localizam-se no intervalo 0.016 - 0.19, indicado na literatura existente como sendo o intervalo de aplicabilidade destes modelos NLSW (Pullen & Allsop, 2003). Não se esperam assim imprecisões devido a este efeito.

Seguindo a recomendação proposta por Hu & Meyer (2005), a fronteira de entrada deve localizar-se aproximadamente a um comprimento de onda do pé da estrutura. Este comprimento de onda, L_s deve ser calculado com a profundidade na fronteira de entrada do modelo ($d = 9.05\text{m}$) ($L_{s\ T=10s} = 87.56\text{m}$ e $L_{s\ T=12s} = 105.08\text{m}$). Neste caso, decidiu-se colocar a fronteira a 111m do pé da estrutura (-5.55m (ZH)). Este ponto coincide com a localização de um transdutor de pressão. A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada a 8.7m a jusante do passadiço de betão do quebra-mar.

O domínio de cálculo tem uma extensão de 150m de comprimento e o número total de células utilizadas foi de 327. Definiu-se uma malha de cálculo não uniforme ao longo de todo o perfil (Figura 5.2). A malha de cálculo apresentada foi utilizada tanto na opção A como na opção B. Na zona mais profunda do domínio, ou seja, em frente ao local de implantação do quebra-mar, as células têm 1m de comprimento. Na zona do quebra-mar e na zona de medição do galgamento, localizada no passadiço de betão do quebra-mar, este comprimento varia entre 0.05m e 0.1m. Esta discretização baseia-se na experiência adquirida em estudos prévios de convergência do modelo para o cálculo do galgamento e é suficientemente fina para assegurar a precisão necessária à análise de sensibilidade e suficientemente larga para reduzir ao mínimo o tempo de cálculo computacional.

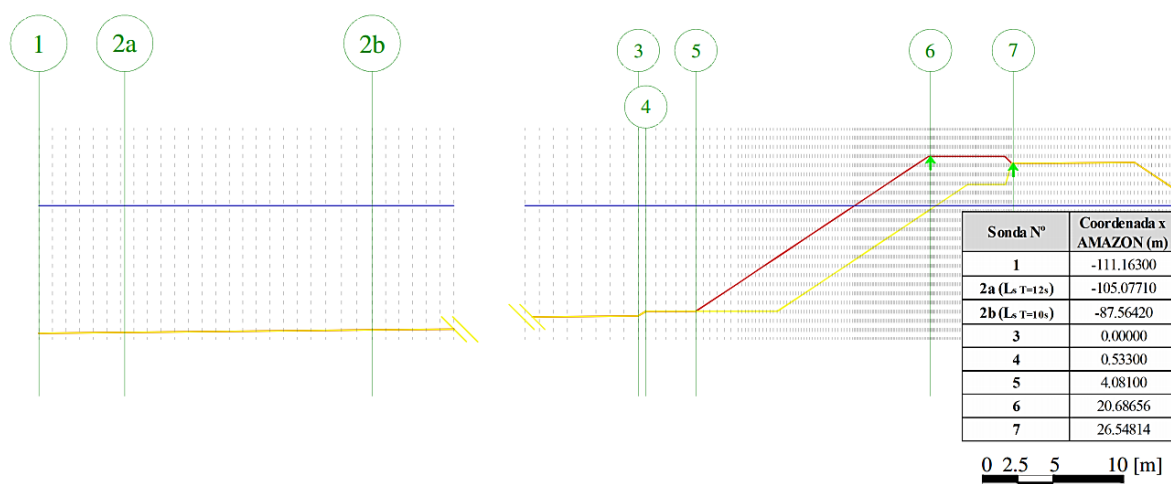


Figura 5.2 – Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada do quebra-mar com uma única camada porosa (a vermelho), dos fundos e passadiço de betão impermeáveis (a amarelo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde) e respectivas coordenadas, em protótipo.

As características geométricas da fronteira sólida em frente ao quebra-mar e da envolvente da estrutura até ao final do passadiço de betão foram fielmente representadas no AMAZON. Os fundos e o passadiço de betão foram modelados como impermeáveis e sem atrito. O modelo AMAZON permite apenas representar uma camada porosa, pelo que se definiu, primeiramente, como camada porosa a correspondente ao manto principal da estrutura, i.e. a camada do manto de protecção composto por enrocamentos de 90 a 120 kN (Figura 4.2), com um peso de blocos de 105 kN que equivale ao valor médio da gama de enrocamento que compõe o manto de protecção (opção A). Seguidamente, definiu-se um peso de 90kN que corresponde ao limite inferior da gama de enrocamento presente no manto de protecção na opção B (com enrocamento de 10 a 30 kN). Nestas definições está implícito, para a opção A, que o manto secundário (com enrocamento de 10 a 30 kN) e o TOT se comportam como materiais totalmente impermeáveis. Paralelamente, para o caso da opção B, o TOT comporta-se como material totalmente impermeável. De acordo com CIRIA/CUR/CETMEF (2007), as dimensões do enrocamento presente no quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, correspondentes aos pesos adotados quer na opção A, quer na opção B, induzem um escoamento turbulento na camada porosa. Por esta razão, recorreu-se à equação de Forchheimer (3.3).

A operação do modelo AMAZON exige a especificação dos parâmetros n , α , β e IP . Em relação a α e β existem valores recomendados na literatura (García, 2007): os valores de α variam entre 1100 e 1800 e os valores de β variam entre 0.55 e 1.10. Com base na análise visual do manto principal adoptaram-se os valores de 0.30, 0.35 e 0.40 para a porosidade (n) uma vez que o enrocamento apresenta uma grande arrumação.

Relativamente ao parâmetro IP , a gama de valores variou entre um mínimo igual a 0.1m/s e um valor máximo. Este máximo corresponde ao valor para o qual o galgamento na sonda 7 (Figura 5.2) é nulo ou ao valor obtido da fórmula (3.6) (Tabela 5.1 e Tabela 5.2 – opção A e opção B, respectivamente) (Reis & Neves, 2010).

Tabela 5.1 – Valores máximos de IP em m/s à escala de protótipo, opção A.

n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)
0.40	1100	0.55	1.74435	0.35	1100	0.55	1.37161	0.30	1100	0.55	1.04873
		0.90	1.36369			0.90	1.07230			0.90	0.81991
		1.10	1.23352			1.10	0.96996			1.10	0.74166
	1800	0.55	1.74411		1800	0.55	1.37135		1800	0.55	1.04845
		0.90	1.36354			0.90	1.07214			0.90	0.81974
		1.10	1.23340			1.10	0.96983			1.10	0.74152
	1500	0.55	1.74421		1500	0.55	1.37146		1500	0.55	1.04857
		0.90	1.36360			0.90	1.07221			0.90	0.81981
		1.10	1.23345			1.10	0.96988			1.10	0.74158

Tabela 5.2 – Valores máximos de IP em m/s à escala de protótipo, opção B.

n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)
0.40	1100	0.55	1.68892	0.35	1100	0.55	1.32801	0.30	1100	0.55	1.01539
		0.90	1.32036			0.90	1.03823			0.90	0.79384
		1.10	1.19433			1.10	0.93914			1.10	0.71808
	1800	0.55	1.68867		1800	0.55	1.32774		1800	0.55	1.01509
		0.90	1.32020			0.90	1.03806			0.90	0.79366
		1.10	1.19420			1.10	0.93900			1.10	0.71793
	1500	0.55	1.68878		1500	0.55	1.32785		1500	0.55	1.01522
		0.90	1.32027			0.90	1.03813			0.90	0.79374
		1.10	1.19426			1.10	0.93906			1.10	0.71800

Foram consideradas sete secções de medição no modelo numérico (Figura 5.2): duas localizadas a barlamar da estrutura e próximas da fronteira de entrada (sondas 1 e 2), três no pé da estrutura (sondas 3 a 5), e as restantes no seu coroamento (sondas 6 e 7). As sondas 6 e 7 foram utilizadas no cálculo do caudal galgado. Em particular, o caudal na sonda 7 será apresentado como resultado da análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo. No Anexo B encontra-se um exemplo de introdução de dados (+3.5m (ZH), H= 4m, T= 12s, ondulação regular, equação de Forchheimer, IP= 0.3m/s, n= 0.35, α = 1500 e β = 0.9) para uma simulação no modelo AMAZON.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam a dependência do caudal médio galgado em relação aos parâmetros do modelo para um período de T= 10s, fixando α em 1100, 1500 e 1800, respectivamente, e variando os restantes parâmetros em estudo – n, IP e β . Os resultados apresentam-se também nas Tabelas C. 1, C. 2 e C. 3 do Anexo C.

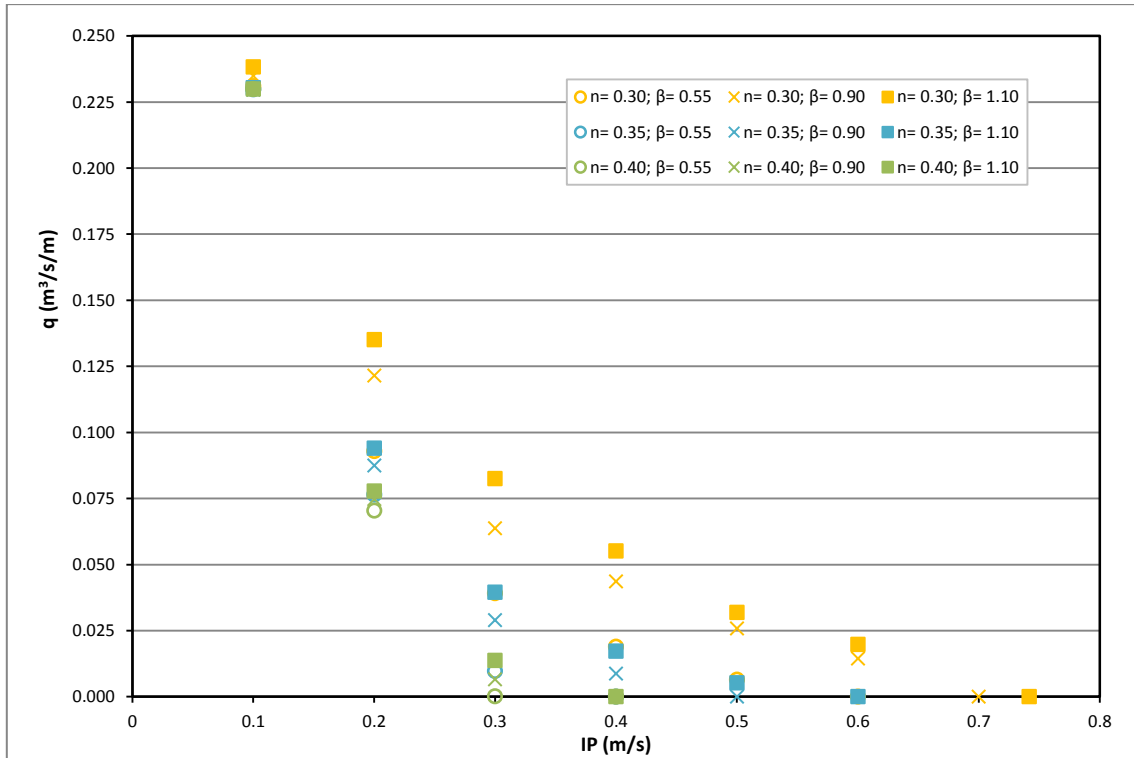


Figura 5.3 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha=1100$ e $T=10s$ na opção A.

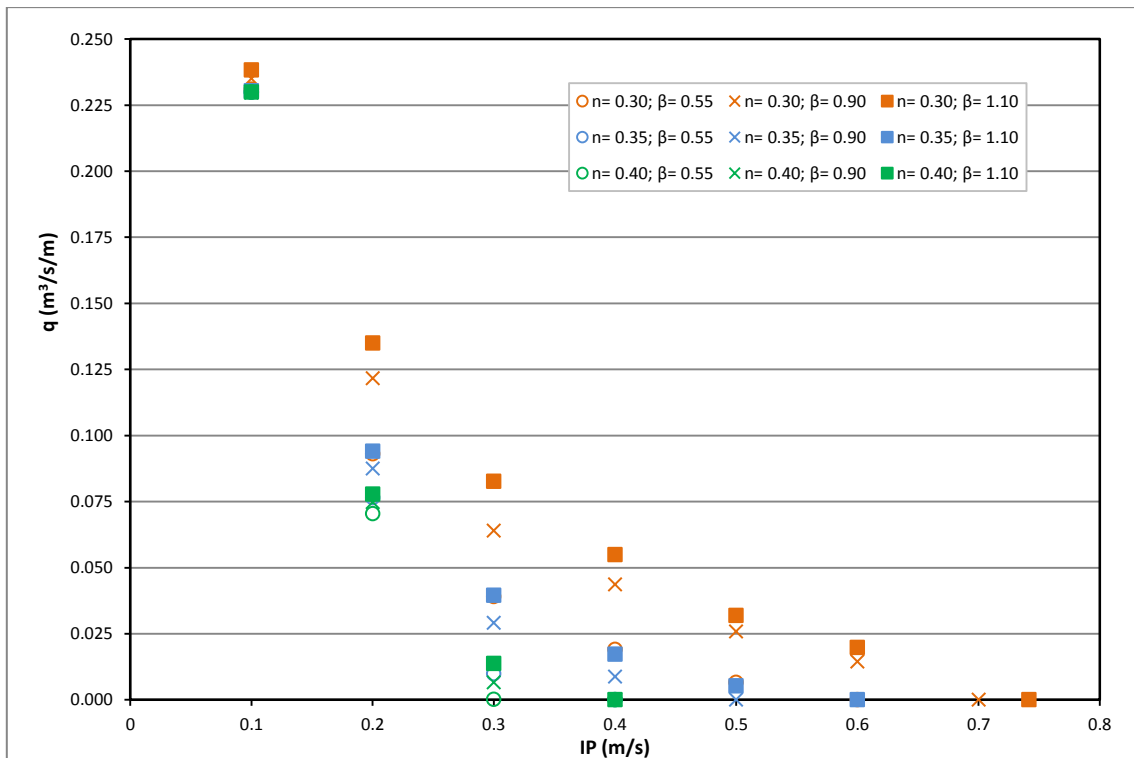


Figura 5.4 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha=1500$ e $T=10s$ na opção A.

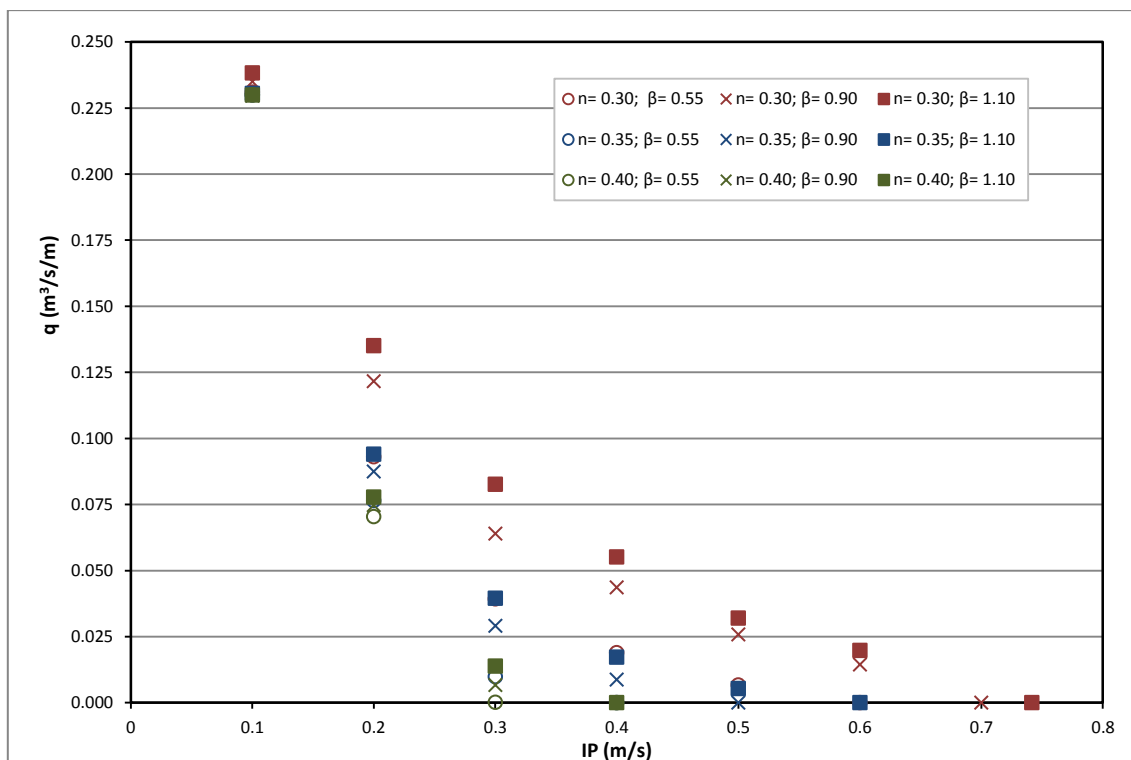


Figura 5.5 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha=1800$ e $T=10s$ na opção A.

Foi possível, ainda, constatar que a porosidade, n , é o parâmetro que mais influencia o galgamento e que quanto maior a porosidade menor o caudal médio galgado. Verificou-se ainda que, o parâmetro IP tem também um efeito considerável no caudal médio galgado.

Por outro lado, as Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostram que quanto maior o valor de β maior também o valor do caudal médio galgado, excepto para $IP=0.1m/s$. Para este valor de IP, não se registam diferenças significativas em função da variação dos outros parâmetros. Uma possível explicação encontra-se na saturação do manto poroso. De notar que β não tem grande influência no galgamento quando comparado com a influência de n e IP. Através das figuras acima apresentadas e do Anexo C, observa-se que o valor de α não introduz diferenças significativas no caudal médio galgado (sonda 7 da Figura 5.2). As diferenças de caudal para diferentes valores de α são, na generalidade dos casos, inferiores a 0.5% e nunca superior a 5.6%. Optou-se por fixar $\alpha=1500$ (Tabela C. 4 do Anexo C). A Figura 5.6 é análoga à Figura 5.4, mas considerando um período de $T=12s$.

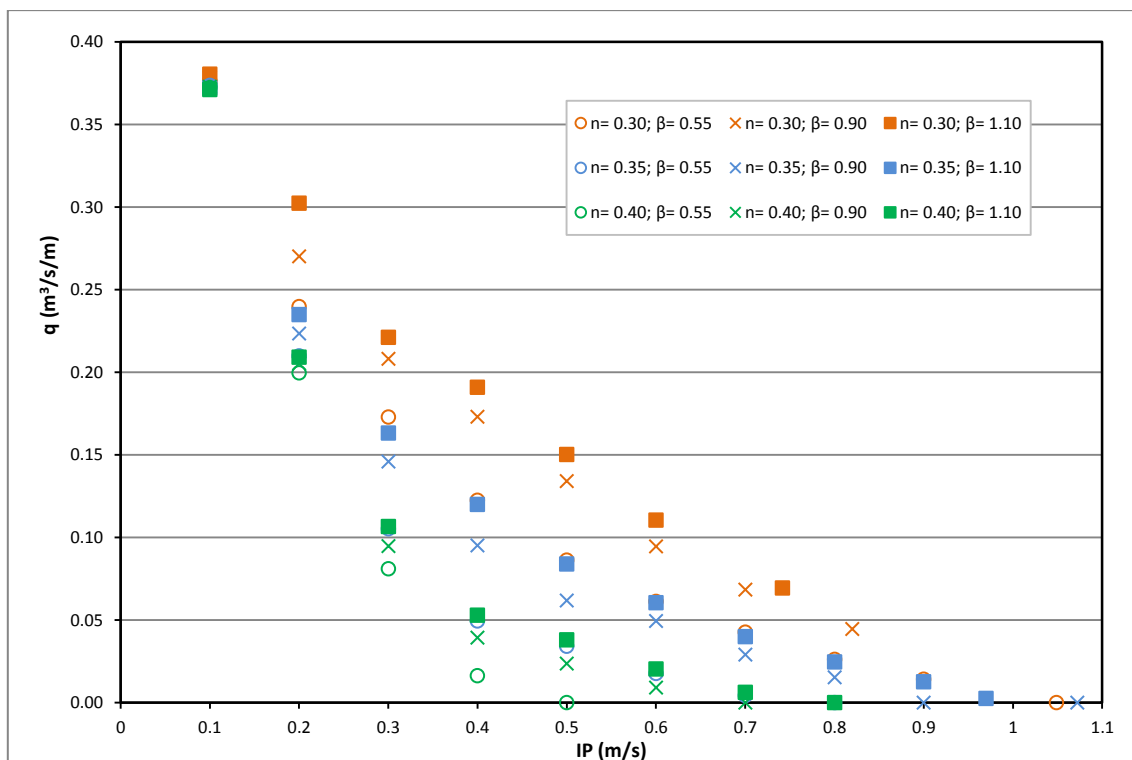


Figura 5.6 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha=1500$ e $T=12s$ na opção A.

Para o período $T=12s$, os parâmetros influenciam o galgamento de forma idêntica à observada para o período $T=10s$. Observam-se caudais médios galgados superiores para $T=12s$ aos observados para $T=10s$, tal como era expectável. Nota-se ainda que para valores de IP inferiores a $0.15m/s$ os restantes parâmetros praticamente não influenciam o galgamento.

Apresentam-se nas Figura 5.7 ($T=10s$) e 5.8 ($T=12s$) a altura de onda significativa calculada através do método do zero descendente implementado em MATLAB® (código no Anexo A), a partir da elevação da superfície livre no pé do talude (sonda 3 da Figura 5.2). As Tabelas C. 1, C. 2, C. 3 e C. 4, do Anexo C, exibem os valores da altura significativa.

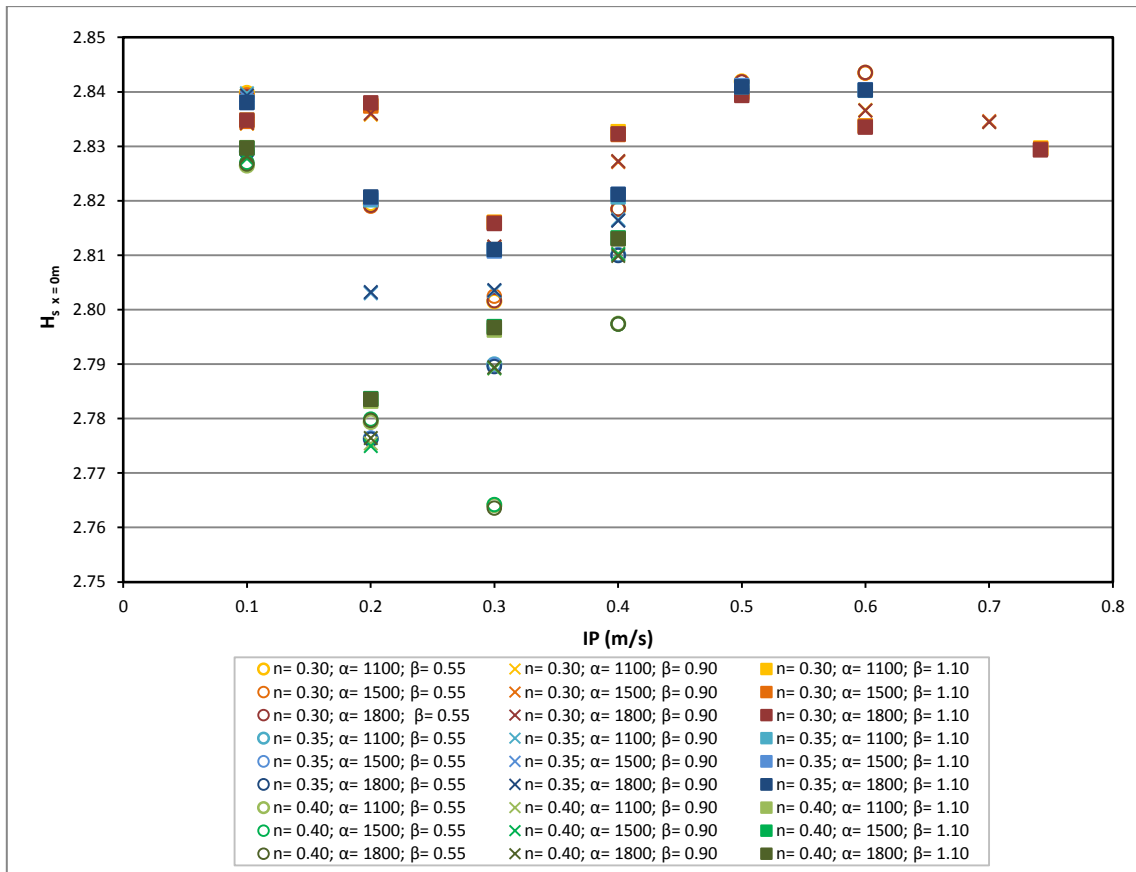


Figura 5.7 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , α , β e IP do meio poroso, para $T=10s$ na opção A.

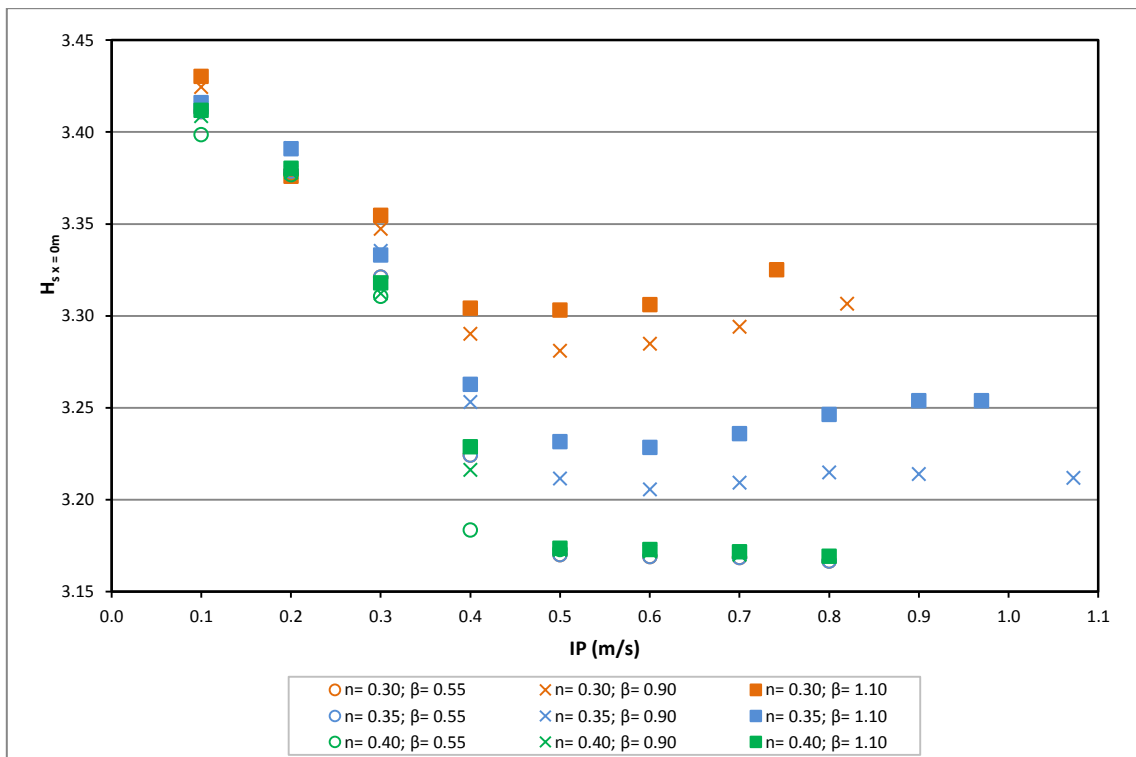


Figura 5.8 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha=1500$ e $T=12s$ na opção A.

Verificou-se, por observação das Figuras 5.7 e 5.8, que para $T= 10s$ a altura significativa é cerca de 2.8m, e para $T= 12s$ é cerca de 3.3m. O andamento da altura significativa com o valor de IP é bastante irregular, porém é possível notar que α não influencia o valor da mesma. Observa-se ainda, que em geral, para maiores porosidades, n , a altura significativa tem tendência a apresentar valores mais baixos.

Os resultados que a seguir se apresentam dizem respeito à opção B e para um período de $T= 10s$ e $\alpha= 1500$ – Figura 5.9 e Tabela C. 5 do Anexo C.

Observou-se que para $n= 0.35$ e $n= 0.40$ os caudais apresentam diferenças muito pequenas. Para o caso particular de $n= 0.30$, β tem a mesma influência que na opção A.

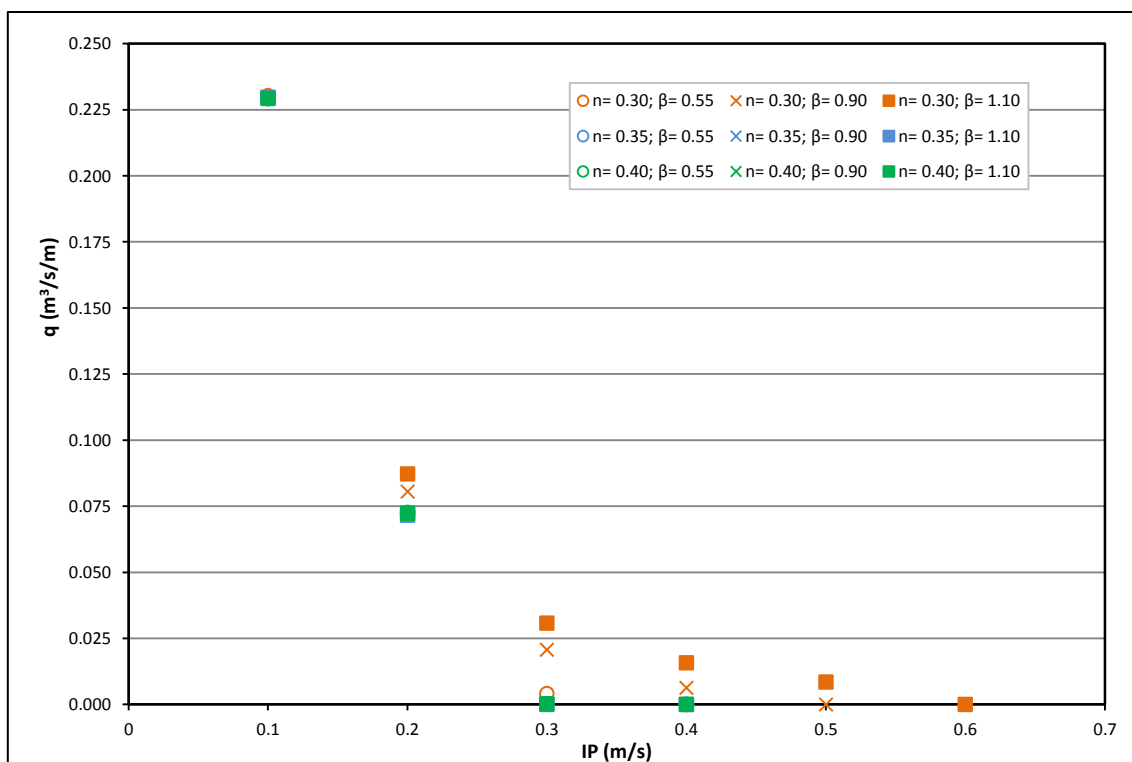


Figura 5.9 – Caudal médio galgado, q , com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha= 1500$ e $T= 10s$ na opção B.

Seguidamente apresenta-se na Figura 5.10 a altura significativa em função do valor de IP no pé do talude (sonda 3 da Figura 5.2) (Tabela C. 5 do Anexo C).

A altura significativa é cerca de 2.8m, aproximadamente a mesma que na opção A. O andamento da altura significativa com o valor de IP é também irregular.

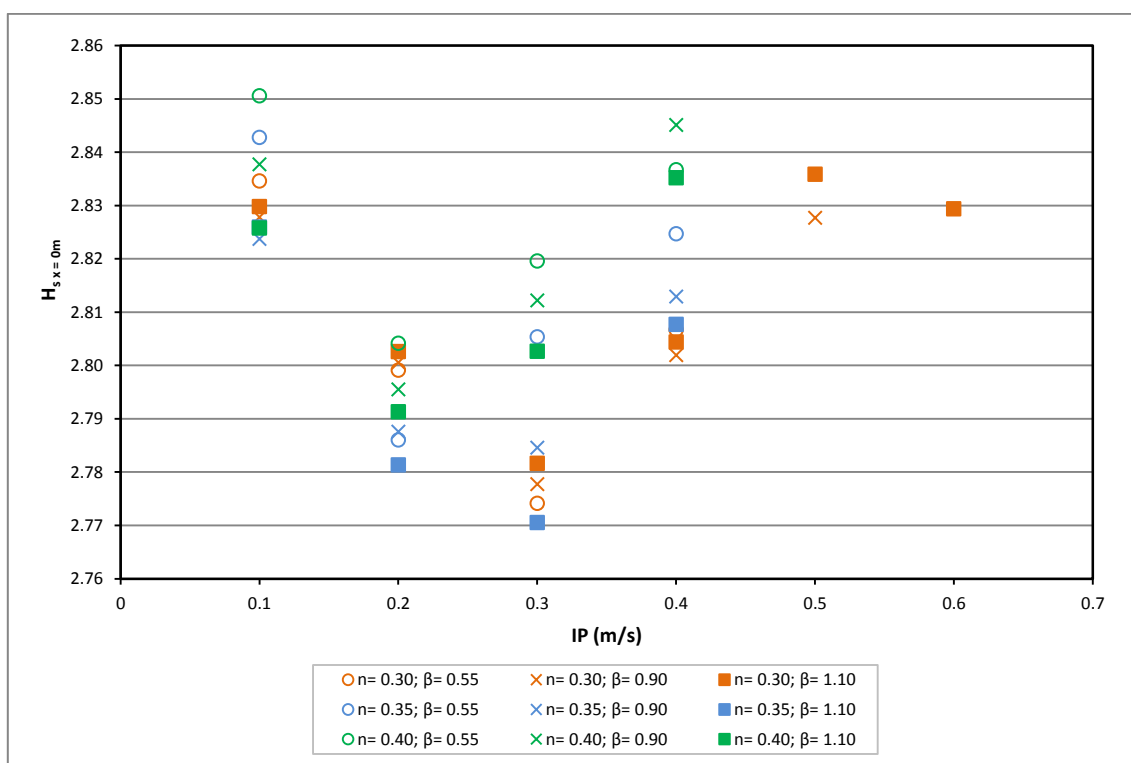


Figura 5.10 – Altura de onda significativa, H_s , no pé do talude com a variação dos parâmetros n , β e IP do meio poroso, para $\alpha = 1500$ e $T = 10s$ na opção B.

5.2.1.2 Modelo e comparação com os resultados obtidos em Protótipo

Para levar a cabo a análise de sensibilidade à escala 1:30 introduziu-se a estrutura no modelo AMAZON recorrendo à semelhança de Froude. A análise foi feita apenas para $T = 12s$ ($T = 2.19s$) e para a opção A.

Verificaram-se novamente as condições de aplicabilidade das equações não lineares para água pouco profunda tendo-se obtido os seguintes resultados:

- $L_{T=2.19s} = 3.37m \rightarrow \text{Águas intermédias, pois } 0.1687m = L/20 < 0.2605m < L_0/2 = 3.75m.$

Utilizaram-se as equações de Forchheimer e de Darcy. A estrutura foi ensaiada sem se considerar a existência de uma camada porosa, tal como referido anteriormente. Não havendo valores na literatura especializada recomendando valores de α e β em modelo, assumiram-se os do protótipo.

O diâmetro nominal utilizado em modelo foi $D_{50} = 0.0533m$ e para este valor recalculou-se o IP máximo, apresentado em seguida na Tabela 5.3 para cada caso de n , α e β .

Tabela 5.3 – Valores máximos de IP em m/s à escala 1:30.

n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)	n (-)	α (-)	β (-)	IP _{máx} (m/s)
0.40	1100	0.55	0.30745	0.35	1100	0.55	0.23856	0.30	1100	0.55	0.17883
		0.90	0.24221			0.90	0.18849			0.90	0.14191
		1.10	0.21967			1.10	0.17111			1.10	0.12902
	1800	0.55	0.30060		1800	0.55	0.23127		1800	0.55	0.17120
		0.90	0.23798			0.90	0.18397			0.90	0.13714
		1.10	0.21619			1.10	0.16740			1.10	0.12509
	1500	0.55	0.30351		1500	0.55	0.23436		1500	0.55	0.17442
		0.90	0.23978			0.90	0.18589			0.90	0.13916
		1.10	0.21767			1.10	0.16898			1.10	0.12676

O domínio de cálculo tem uma extensão de 5m de comprimento e o número total de células utilizadas foi de 327. Definiu-se uma malha de cálculo não uniforme ao longo de todo o perfil (Figura 5.11). Na zona mais profunda do domínio, ou seja, em frente ao local de implantação do quebra-mar as células têm 0.0333m de comprimento. Na zona do quebra-mar até à zona de medição do galgamento, no passadiço de betão do quebra-mar, este comprimento varia entre 0.0017m e 0.0033m.

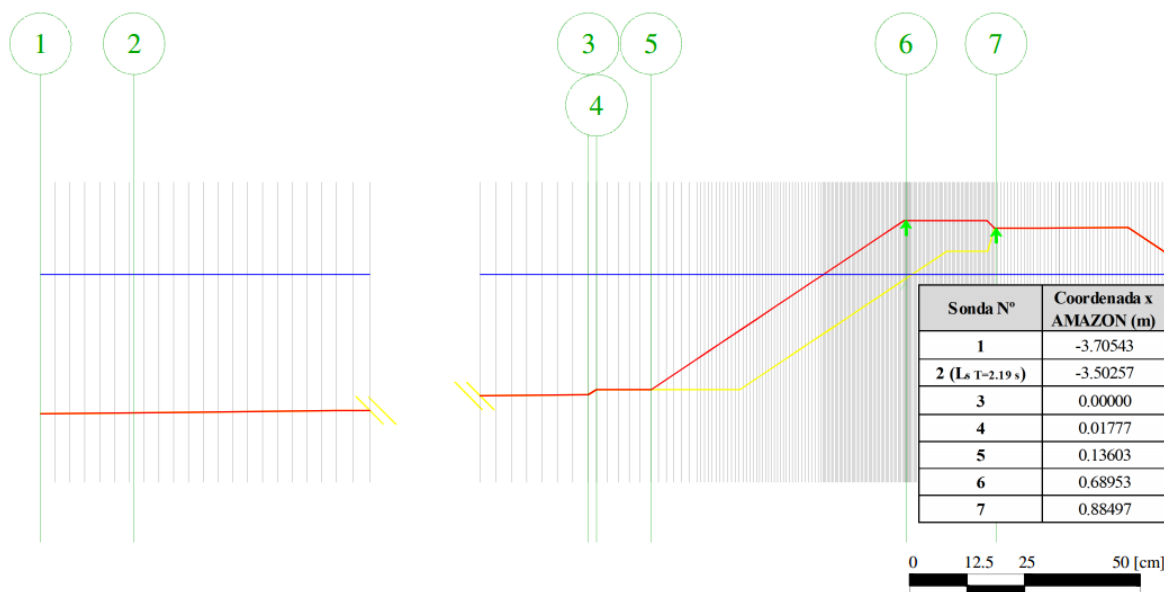


Figura 5.11 – Representação esquemática da discretização da malha computacional utilizada do quebra-mar com uma única camada porosa (a vermelho), dos fundos e passadiço de betão impermeáveis (a amarelo), do nível de água em repouso (a azul) e da localização das secções de medição (a verde) e respectivas coordenadas, à escala 1:30.

Sintetizam-se de seguida, na Tabela 5.4, os casos simulados à escala de modelo, 1:30.

Tabela 5.4 – casos ensaiados à escala 1:30, na opção A.

Equação de Forchheimer	$n = 0.35, \alpha = 1500$ e $\beta = 0.90$
	$n = 0.40, \alpha = 1500$ e $\beta = 0.90$
	$n = 0.35, \alpha = 1500$ e $\beta = 1.10$
	$n = 0.35, \alpha = 1100$ e $\beta = 0.90$
Equação de Darcy	$n = 0.35$
Impermeável	–

Nas Figuras 5.12 e 5.13 apresentam-se os resultados dos caudais médios galgados e as alturas significativas na sonda de pé de talude, respectivamente, para as condições apresentadas na Tabela 5.4 (Tabela C. 6).

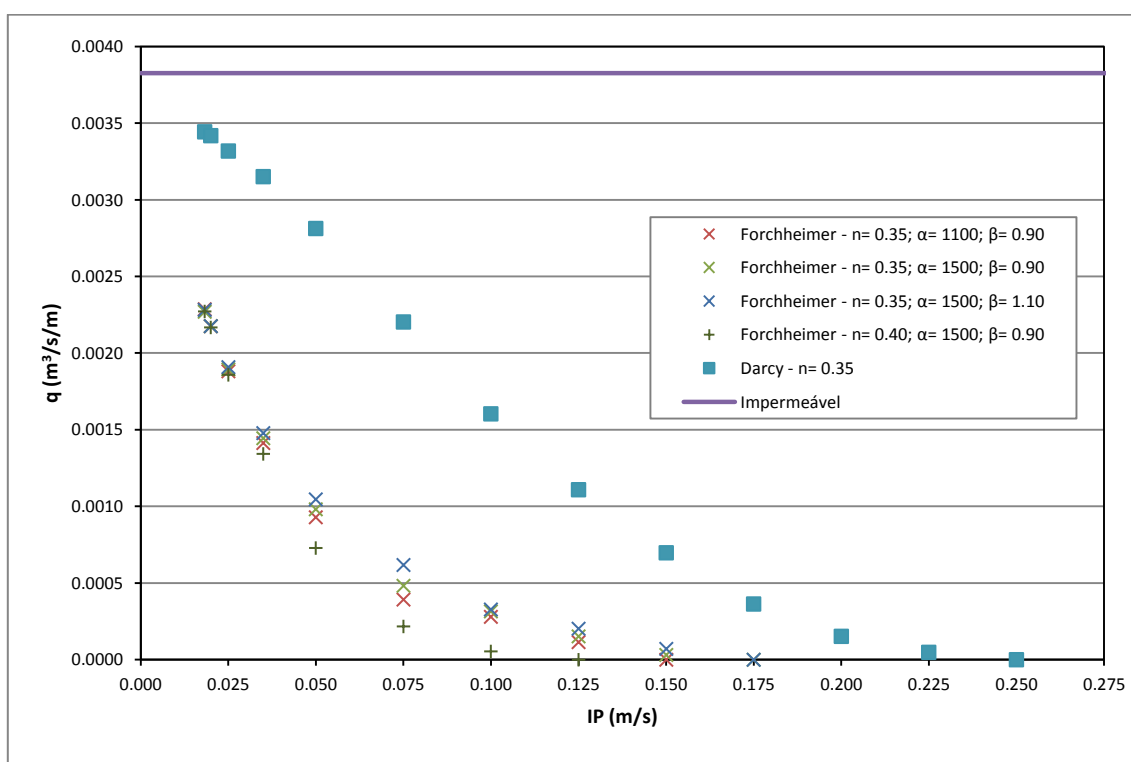


Figura 5.12 – Variação do caudal médio galgado, q , com a variação do parâmetro n, α, β e IP do meio poroso calculado com a equação de Forchheimer, com a variação de IP recorrendo à equação de Darcy e considerando a estrutura impermeável, para $T = 2.19s$, na opção A à escala 1:30.

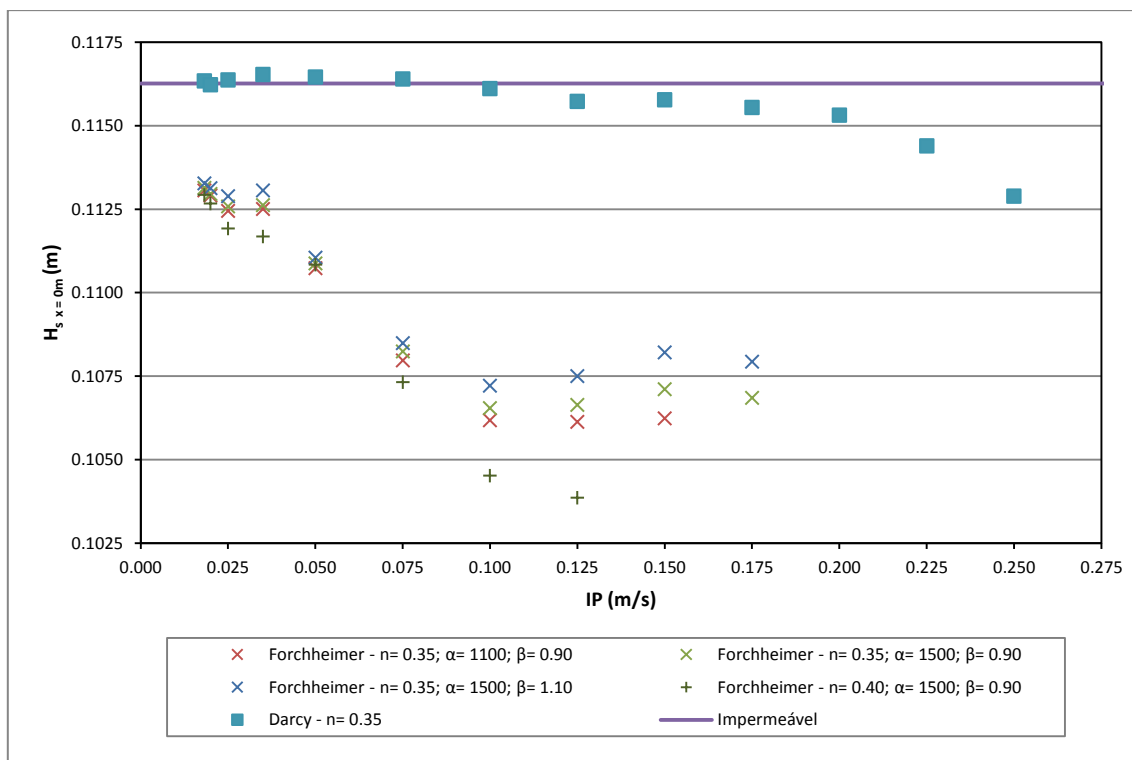


Figura 5.13 – Altura significativa na sonda do pé de talude, H_s , com a variação do parâmetro n , α , β e IP do meio poroso calculado com a equação de Forchheimer, com a variação de IP recorrendo à equação de Darcy e considerando a estrutura impermeável, para $T= 2.19s$, na opção A à escala 1:30.

A Figura 5.12 mostra que o caudal calculado através da equação de Darcy é bastante superior ao caudal calculado através da equação de Forchheimer. Como era de esperar, o caudal máximo é obtido quando não é considerada nenhuma camada porosa.

A altura significativa observada na modelação da camada porosa recorrendo à equação de Forchheimer apresenta um andamento semelhante ao observado anteriormente. Observa-se ainda que a altura significativa não se altera no caso de não se considerar camada porosa e utilizando a equação de Darcy, excepto para permeabilidades superiores a 0.2m/s. Neste último caso a altura significativa vai decrescendo com o aumento da permeabilidade.

Os resultados obtidos utilizando a equação de Forchheimer diferem bastante dos obtidos com a equação de Darcy. A explicação pode residir no carácter turbulento do escoamento na camada porosa. Nessa circunstância a equação de Darcy perderia validade.

Apresenta-se nas Figuras 5.14 e 5.15 (Tabela C. 7 do Anexo C) a comparação das simulações em protótipo e em modelo (escala 1:30) para os casos em que se utilizou a equação de Forchheimer. Esta comparação foi feita transformando os valores de modelo para protótipo usando a semelhança de Froude.

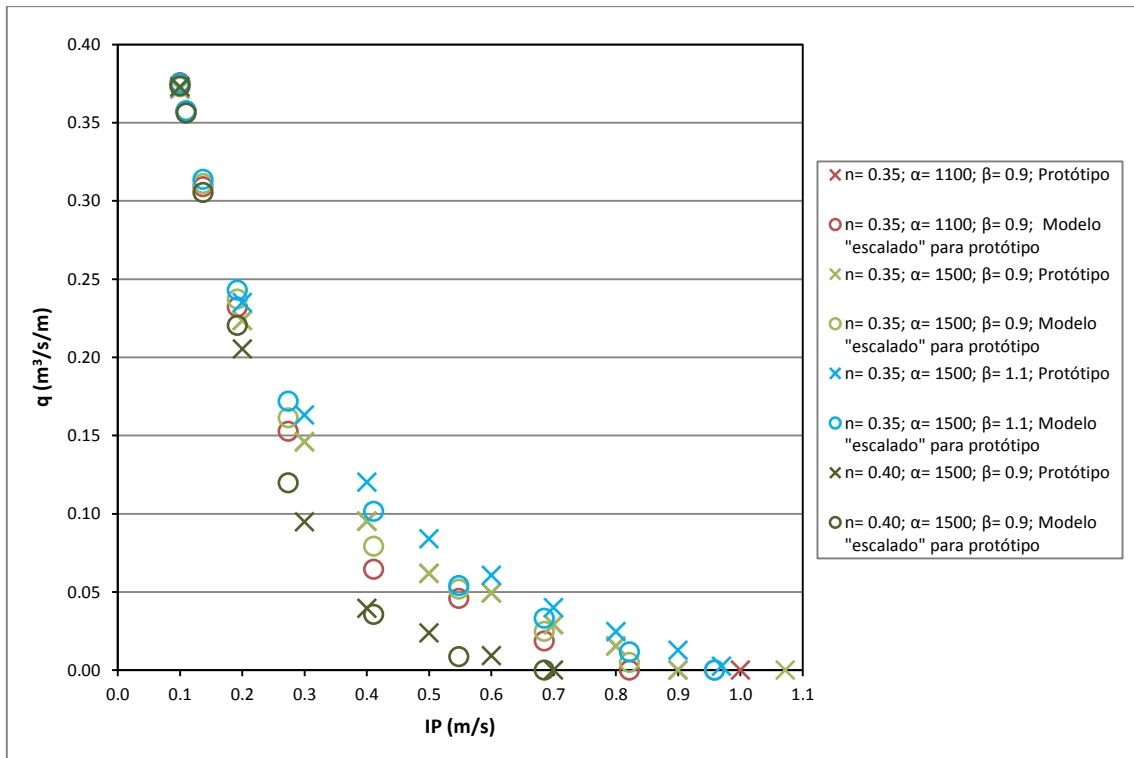


Figura 5.14 – Comparação dos resultados de caudal médio galgado, q , recorrendo à equação de Forchheimer no modelo AMAZON, aplicado à escala do protótipo e à escala 1:30, para $T=12\text{s}$.

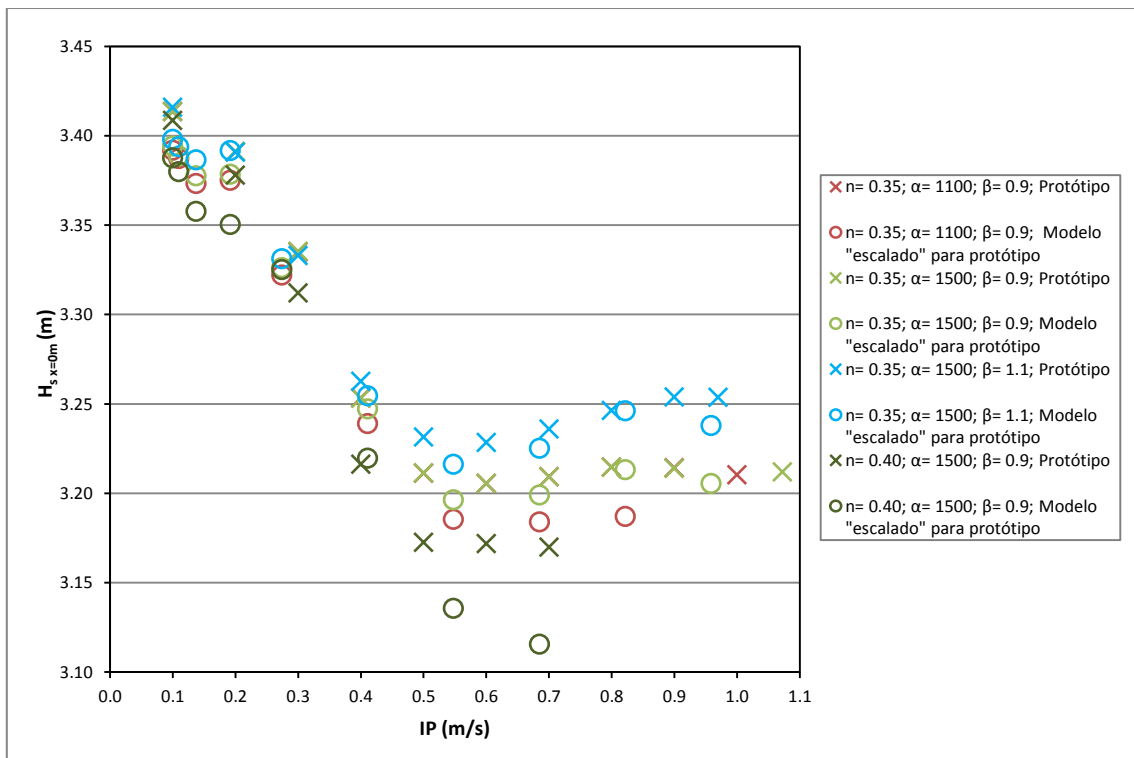


Figura 5.15 – Comparação dos resultados da altura significativa na sonda do pé de talude, $H_{s, x=0m}$, recorrendo à equação de Forchheimer no modelo AMAZON, aplicado à escala do protótipo e à escala 1:30, para $T=12\text{s}$.

Contrariamente ao observado no protótipo, regista-se uma certa influência de α no caudal calculado à escala 1:30. Por outro lado, os valores “escalados” são, em geral, inferiores aos do protótipo.

5.2.2 Ajustamento dos parâmetros e análise para as condições de agitação irregular

Uma vez que não foi possível verificar e calibrar o modelo AMAZON devido à inexistência de dados de campo, tentou-se ajustar, tanto quanto possível, os parâmetros da equação de Forchheimer por comparação com as simulações do modelo IH-2VOF. Este ajuste foi apenas feito para protótipo. Tal como referido anteriormente, a porosidade dos mantos é o factor que mais influencia o galgamento, seguido do IP. Como o modelo IH-2VOF não é integrado na vertical, permite modelar separadamente cada camada presente, não sendo necessário definir IP. Comparando os resultados de caudal obtidos nos dois modelos numéricos, com a mesma porosidade, o valor de IP no AMAZON deveria ser da ordem de 0.3 a 0.4m/s (Mariz et al., 2012), tendo-se adoptado o valor médio deste intervalo.

Em relação aos restantes parâmetros, foram escolhidos os valores médios, dentro dos recomendados na literatura, para os parâmetros: $\alpha= 1500$ e $\beta= 0.9$. Para a porosidade assumiu-se um valor médio de $n=0.35$. Fez-se ainda a comparação entre os resultados obtidos com ondas regulares e com agitação irregular gerada pelo espectro JONSWAP, para períodos de $T_p= 10s$ e $T_p= 12s$ – Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados do caudal médio galgado, q , e alturas de onda significativa, média e máxima no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, $H_{m\ x=0m}$ e $H_{máx\ x=0m}$, respectivamente, com o espectro JONSWAP e ondas regulares, $n= IP= 0.35$, $\alpha= 1500$ e $\beta= 0.9$ do meio poroso, para $T= 10s$ e $T= 12s$, na opção A através do modelo AMAZON.

T_p (s)	Tipo de ondulação	$H_{s\ AMAZON}$ (m)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)	$H_{m\ x=0m}$ (m)	$H_{máx\ x=0m}$ (m)
12	Regular	4	0.1196332	3.320367	3.316712	3.351989
	Espectro JONSWAP	4	0.0370974	2.968726	2.049262	4.555749
		3	0.0064806	2.438307	1.674145	3.85625
		2	0.0002867	1.844196	1.21712	2.989989
		1	0.0000000	0.940037	0.608135	1.744979
10	Regular	4	0.020877	2.789649	2.787513	2.791598
	Espectro JONSWAP	4	0.0159944	2.599803	1.704242	3.845224
		3	0.0012309	2.130756	1.336932	3.166555
		2	0.0000000	1.525742	0.938521	2.236148

5.3 Formulações Empíricas

5.3.1 Formulação Empírica de Owen (1980)

De acordo com a formulação empírica de Owen (Besley, 1999) para a estrutura do tipo 3 – estrutura simples de talude permeável – que é a que mais se aproxima do quebra-mar em estudo, introduziram-se os seguintes parâmetros de entrada, tentando reproduzir com a maior fidelidade possível o perfil da estrutura em estudo (Figura 4.1):

- Nível +3.5m (ZH);
- $d_s = 7.816\text{m}$;
- $A = 0.0084$ e $B = 19.9$, de acordo com Besley (1999) para 2:3 de declive;
- $G_c = 5.875\text{m}$;
- $H_s = H_{m0} = 4, 3, 2$ e 1m ;
- $\gamma_f = 0.5$ para compatibilizar entre os vários intervalos sugeridos nas várias formulações;
- $T = T_m = T_p/1.2 = 10.00$ e 8.33s ;
- $\beta = 0^\circ$;
- Coroamento permeável.

Apresentam-se os resultados do caudal médio galgado, q , na Tabela 5.6, para as várias hipóteses acima indicadas. Nesta tabela apresenta-se também o bordo livre adimensionalizado, R , confirmando-se a aplicabilidade desta formulação para o caso de estudo através da verificação ($0.05 < R < 0.30$).

Tabela 5.6 – Resultados do caudal médio galgado, q , e do bordo livre adimensionalizado, R , da formulação empírica de Owen (1980), em protótipo.

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	R (-)	q (l/s/m) Besley, 1999
+3.5	7.816	12.0	10.91	10.00	1.0	0.11	0.005
					2.0	0.08	2.789
					3.0	0.06	32.364
					4.0	0.06	126.863
		10.0	9.09	8.33	1.0	0.13	0.002
					2.0	0.09	1.239
					3.0	0.08	16.138
					4.0	0.07	67.764

No Anexo D apresenta-se um exemplo de introdução de dados na folha de cálculo utilizada para estimar o caudal médio galgado através da formulação empírica de Owen (1980) (Besley, 1999).

Através da semelhança de Froude procedeu-se à passagem dos parâmetros da estrutura para a escala 1:30, tendo-se obtido:

- Nível +0.1167m (ZH);
- $d_s = 0.2605\text{m}$;
- $A = 0.0084$ e $B = 19.9$, de acordo com Besley (1999) – declive de 2:3;

- $G_c = 0.1958(3)m$;
- $H_s = H_{m0} = 0.1333, 0.1000, 0.0667$ e $0.0333m$;
- $\gamma_i = 0.5$ para compatibilizar entre os vários intervalos sugeridos nas várias formulações;
- $T = T_m = T_p/1.2 = 1.826$ e $1.521s$;
- $\beta = 0^\circ$;
- Coroamento permeável.

Apresentam-se os resultados na Tabela 5.7 dos caudais médios galgados para as várias hipóteses anteriormente indicadas. Na tabela apresenta-se também o bordo livre adimensionalizado, R, confirmando-se, novamente, a aplicabilidade desta formulação para o caso de estudo através da verificação ($0.05 < R < 0.30$).

Tabela 5.7 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica de Owen (1980), à escala 1:30.

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	R (-)	q (l/s/m) Besley, 1999
+0.1167	0.2605	2.191	1.992	1.826	0.03333	0.11	0.000
					0.06667	0.08	0.017
					0.10000	0.06	0.197
					0.13333	0.06	0.772
		1.826	1.660	1.521	0.03333	0.13	0.000
					0.06667	0.09	0.008
					0.10000	0.08	0.098
					0.13333	0.07	0.412

5.3.2 Metodologia do “Actual Manual dos Galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007)

Seguiu-se a metodologia proposta no “Actual Manual dos Galgamentos” – EurOtop (Pullen et al., 2007) para estimar o caudal médio galgado em estruturas com talude permeável composto com berma de coroamento. Para efectuar o cálculo utilizaram-se como dados de entrada os indicados de seguida:

- $T_p = 10$ e $12s$;
- $H_{m0} = 4, 3, 2$ e $1m$;
- $R_c = 3.5m$ – Resulta da subtracção entre nível do coroamento (+7.0m (ZH)) e o nível médio da água do mar (+3.5m (ZH));
- $G_c = 5.875m$;

- Inclinação do talude 2:3 tanto no talude inferior como no superior;
- $\gamma_{\beta} = 1$;
- $\gamma_i = 0.5$ – Compatibilização com a ferramenta empírica de cálculo utilizada anteriormente e dentro do limite de aplicabilidade desta formulação.

Apresentam-se na Tabela 5.8 os caudais médios galgados para as várias hipóteses anteriormente indicadas. Na tabela apresenta-se também o bordo livre adimensionalizado, R, verificando-se que esta formulação não é aplicável a $H_{m0} = 1\text{m}$.

Tabela 5.8 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica presente no “actual manual dos galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007), em protótipo.

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	R (-)	q (l/s/m) Pullen et al., 2007
3.5	7.816	12.0	10.91	10.00	1.0	3.50	0.000
					2.0	1.75	0.007
					3.0	1.17	1.224
					4.0	0.88	17.899
	10.0	9.09	8.33	1.0	3.50	0.000	
				2.0	1.75	0.007	
				3.0	1.17	1.223	
				4.0	0.88	17.892	

Para as características da estrutura em estudo (talude 2:3) o caudal médio galgado calculado através da metodologia proposta pelo “actual manual dos galgamentos” (Pullen et al., 2007) não é influenciado pelo período de onda.

Apresenta-se no Anexo E um exemplo de introdução dos parâmetros de entrada para obtenção do caudal médio galgado, na estrutura em estudo, segundo a metodologia do “actual manual dos galgamentos” (Pullen et al., 2007).

Através da semelhança de Froude foi possível “escalar” os dados de entrada para a escala 1:30. Apresentam-se seguidamente estes mesmos dados:

- $T_p = 1.826$ e 2.191s ;
- $H_{m0} = 0.13333, 0.10000, 0.06667$ e 0.03333m ;
- $R_c = 0.1167\text{m}$ – Resulta da subtração entre nível do coroamento ($+0.233\text{m}$ (ZH)) e o nível médio da água do mar ($+0.1167\text{m}$ (ZH));
- $G_c = 0.19583\text{m}$;
- Inclinação do talude 2:3 tanto no talude inferior como no superior;

- $\gamma_\beta = 1$;
- $\gamma_f = 0.5$ – Compatibilização com a ferramenta empírica de cálculo utilizada anteriormente e dentro do limite de aplicabilidade desta formulação.

Apresentam-se na Tabela 5.9 os caudais médios galgados para as várias hipóteses anteriormente indicadas. Na tabela apresenta-se também o bordo livre adimensionalizado, R, verificando-se que esta formulação não é aplicável a $H_{m0} = 0.03333m$.

Tabela 5.9 – Resultados do caudal médio galgado, q, e bordo livre adimensionalizado, R, da formulação empírica presente no “actual manual dos galgamentos” - EurOtop (Pullen et al., 2007), à escala 1:30

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	R (-)	q (l/s/m) Pullen et al., 2007
+0.1167	0.2605	2.191	1.992	1.826	0.03333	3.50	0.000
					0.06667	1.75	0.000
					0.10000	1.17	0.007
					0.13333	0.88	0.109
		1.826	1.660	1.521	0.03333	3.50	0.000
					0.06667	1.75	0.000
					0.10000	1.17	0.007
					0.13333	0.88	0.109

À escala 1:30 o caudal médio galgado não é influenciado pelo período, segundo a formulação proposta em Pullen et al. (2007), tal como à escala do protótipo.

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que na presente formulação e para as características da estrutura em estudo (talude 2:3) o período não influencia o caudal médio galgado.

5.4 Redes Neurais Artificiais

Por último, calculou-se o galgamento através de uma ferramenta baseada na análise de redes neuronais artificiais, NN_OVERTOPPING2, que considera 15 parâmetros de entrada para definir a estrutura e as condições de agitação. Note-se que, analisando a base de dados (<http://www.clash.ugent.be/>) das redes neuronais verificou-se que não existe, contudo, nenhuma estrutura idêntica ao quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

Apresentam-se em seguida os parâmetros de entrada utilizados para a estimativa do caudal médio galgado:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura ($\beta = 0^\circ$);
- $d_s = 7.816m$;
- $H_{m0} = 4, 3, 2$ e $1m$;
- $T_{m-1,0} = T_p/1.1 = 10.091$ e $9.091s$;
- $h_t = 7.816m$;

- $B_t = 0\text{m}$;
- $\gamma_f = 0.5$;
- $\text{Cot}(\alpha_d) = \text{Cot}(\alpha_u) = 1.5$;
- $R_c = 3.0\text{m}$;
- $B = h_b = 0\text{m}$;
- $\text{Tan}(\alpha_B) = 0$;
- $A_c = 3.5\text{m}$;
- $G_c = 5.875\text{m}$.

A Tabela 5.10 indica os resultados dos caudais médios galgados para as várias hipóteses indicadas anteriormente.

Tabela 5.10 – Resultados do caudal médio galgado, q , q' , $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$ obtidos através da ferramenta NN_OVERTOPPING2, em protótipo.

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	q (l/s/m)	q' (l/s/m)	$q_{2.5\%}$ (l/s/m)	$q_{97.5\%}$ (l/s/m)
+3.5	7.816	12.0	10.91	10.00	1.0	0.11	0.38	0.00	8.61
					2.0	0.94	1.28	0.08	10.49
					3.0	9.10	9.10	2.22	34.78
					4.0	54.37	54.37	16.28	176.80
		10.0	9.09	8.33	1.0	0.05	0.25	0.00	2.56
					2.0	0.47	0.84	0.06	3.21
					3.0	5.16	5.20	1.46	18.62
					4.0	29.65	29.65	9.40	90.86

Verificou-se que, para uma mesma altura de onda, os resultados de caudal médio galgado para um período $T_p = 10\text{s}$ são cerca de metade dos resultados obtidos para um período de $T_p = 12\text{s}$.

No Anexo F encontra-se um exemplo de um ficheiro de introdução de dados (“input file”) para obtenção do caudal médio galgado através da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

Por fim, introduziram-se os parâmetros de entrada da NN_OVERTOPPING2 após a passagem do protótipo para a escala 1:30 recorrendo à semelhança de Froude. Apresentam-se seguidamente os dados de entrada da NN_OVERTOPPING2:

- Ondulação incidente perpendicular à estrutura ($\beta = 0^\circ$);
- $d_s = 0.261\text{m}$;
- $H_{m0} = 0.133, 0.100, 0.067$ e 0.033m ;
- $T_{m-1,0} = T_p/1.1 = 1.992$ e 1.660s ;

- $h_t = 0.261\text{m}$;
- $B_t = 0\text{m}$;
- $\gamma = 0.5$;
- $\text{Cot}(\alpha_d) = \text{Cot}(\alpha_u) = 1.5$;
- $R_c = 0.100\text{m}$;
- $B = h_b = 0\text{m}$;
- $\text{Tan}(\alpha_B) = 0$;
- $A_c = 0.117\text{m}$;
- $G_c = 0.196\text{m}$.

Os resultados dos caudais médios galgados para as várias hipóteses anteriormente indicadas estão presentes na Tabela 5.11

Tabela 5.11 – Resultados do caudal médio galgado, q , q' , $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$ obtidos através da ferramenta NN_OVERTOPPING2, à escala 1:30.

Nível (m) ZH	d_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	T_m (s)	H_{m0} (m)	q (l/s/m)	q' (l/s/m)	$q_{2.5\%}$ (l/s/m)	$q_{97.5\%}$ (l/s/m)
+0.1167	0.2605	2.191	1.992	1.826	0.03333	0.001	-	0.000	0.052
					0.06667	0.006	-	0.001	0.064
					0.10000	0.055	-	0.013	0.211
					0.13333	0.323	-	0.097	1.052
		1.826	1.660	1.521	0.03333	0.000	-	0.000	0.015
					0.06667	0.003	-	0.000	0.020
					0.10000	0.031	-	0.009	0.113
					0.13333	0.177	-	0.056	0.540

5.5 Comparação e Discussão de Resultados

De modo a possibilitar a comparação de resultados entre as várias metodologias utilizadas para estimar o caudal médio galgado na estrutura de Albufeira, foi necessário obter a altura de onda e período (Tabela 5.12) na sonda de pé de talude (sonda 3 da Figura 5.2), a partir dos dados de elevação da superfície livre no modelo ANAZON.

Tabela 5.12- Resultados da altura significativa, H_s , altura de onda média, H_m , altura de onda um décimo, $H_{1/10}$, período de onda médio, T_m , período de onda significativo, T_s , período de onda máximo, $T_{máx}$ e período um terço, $T_{1/3}$ na sonda de pé de talude, com o espectro JONSWAP, $n= IP= 0.35$, $\alpha= 1500$ e $\beta= 0.9$ do meio poroso, para $T= 10s$ e $T= 12s$, na opção A através do modelo AMAZON.

T_p AMAZON (s)	H_s AMAZON (m)	q AMAZON (l/s/m)	H_s (m)	H_m (m)	$H_{1/10}$ (m)	$H_{máx}$ (m)	T_m (s)	T_s (s)	$T_{máx}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)
12	4	37.097	2.969	2.049	3.392	4.556	9.867	12.112	18.300	9.867
	3	6.481	2.438	1.674	2.878	3.856	10.068	11.742	18.100	10.068
	2	0.287	1.844	1.217	2.291	2.990	10.068	11.506	17.700	10.068
	1	0.000	0.940	0.608	1.223	1.745	10.746	12.171	16.000	10.746
10	4	15.994	2.600	1.704	3.062	3.845	7.673	9.335	15.400	7.673
	3	1.231	2.131	1.337	2.509	3.167	7.226	8.741	15.000	7.226
	2	0.000	1.526	0.939	1.901	2.236	7.200	8.630	14.800	7.200

Para os valores presentes na Tabela 5.12 calcularam-se os caudais médios de galgamento na estrutura em estudo através das formulações empíricas (Tabela 5.13). Para calcular o caudal médio galgado através da ferramenta NN_OVERTOPPING2 foi necessário calcular o período médio da onda na frente da estrutura, definido com os momentos espectrais m_{-1} e m_0 , recorrendo às expressões (2.15) e (2.16) e ao período médio, T_m , estimado a partir da série temporal obtida do modelo AMAZON na sonda do pé do talude (Tabela 5.13). Estes caudais foram comparados com o caudal médio galgado simulado através do modelo numérico AMAZON. Na Figura 5.16 apresenta-se esta comparação e a Figura 5.17 ilustra a referida comparação mas apenas para os pequenos caudais.

Tabela 5.13 – Resultados do caudal médio galgado, q , obtidos pelas formulações empíricas de Owen (1980) (Besley, 1999) e metodologia proposta no “actual manual dos galgamentos” – EurOtop, Pullen et al. (2007).

H_s Owen (1980) (m)	T_m Owen (1980) (s)	q Owen (1980) (l/s/m)	H_s Pullen et al. (2007) (m)	T_m Pullen et al. (2007) (s)	q Pullen et al. (2007) (l/s/m)
2.969	9.867	29.193	2.969	9.867	1.096
2.438	10.068	10.368	2.438	10.068	0.113
1.844	10.068	1.602	1.844	10.068	0.002
0.940	10.746	0.003	0.940	10.746	0.000
2.600	7.673	4.902	2.600	7.673	0.247
2.131	7.226	0.964	2.131	7.226	0.019
1.526	7.200	0.016	1.526	7.200	0.000

Tabela 5.14 – Resultados do caudal médio galgado, q , obtidos através do NN_OVERTOPPING2.

H_s NN_OVERTOPP ING2 (m)	$T_{m-1,0}$ NN_OVERTOPP ING2 (s)	q NN_OVERTOPP ING2 (l/s/m)	q' NN_OVERTOPP ING2 (l/s/m)	$q_{2.5\%}$ NN_OVERTOPP ING2 (l/s/m)	$q_{97.5\%}$ NN_OVERTOPP ING2 (l/s/m)
2.969	10.764	8.106	8.108	2.022	31.450
2.438	10.984	2.683	2.850	0.447	16.400
1.844	10.984	0.691	1.051	0.053	8.911
0.940	11.723	-	0.000	-	-
2.600	8.370	1.692	1.951	0.401	6.579
2.131	7.883	0.437	0.803	0.077	2.495
1.526	7.855	0.092	0.350	0.008	1.456

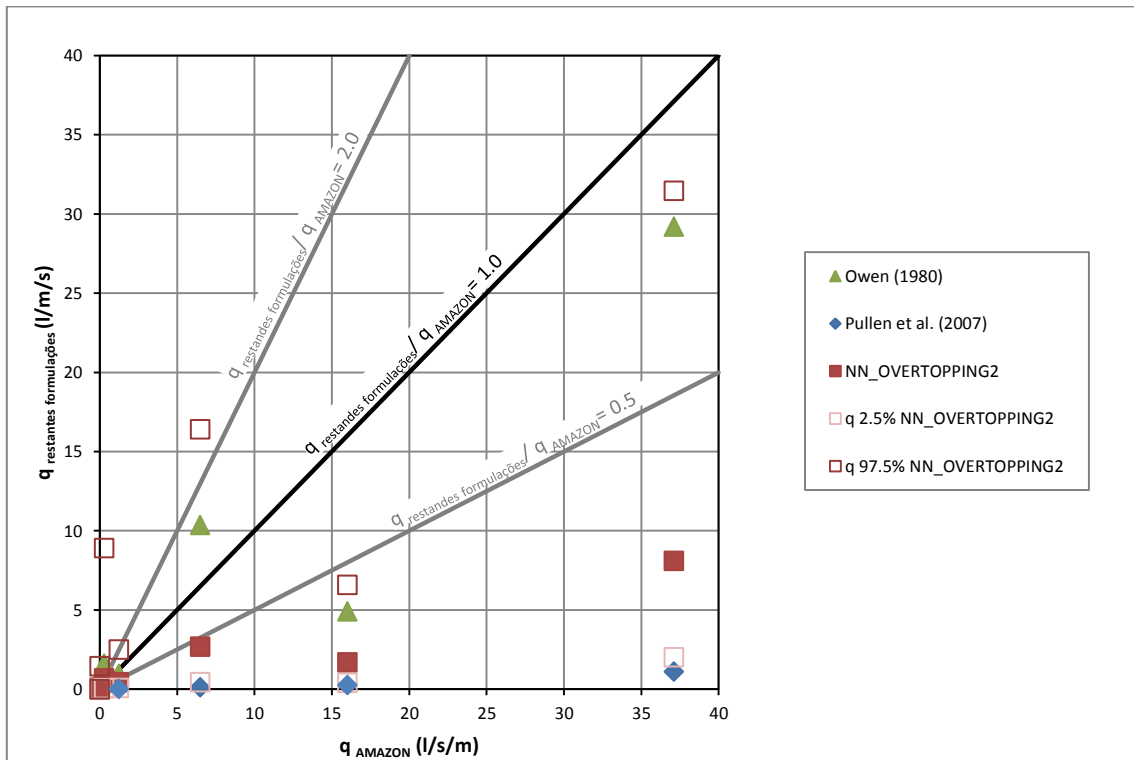


Figura 5.16 – Comparação entre os caudais médios galgados obtidos no modelo numérico AMAZON, q_{AMAZON} , e os caudais médios galgados obtidos através das formulações empíricas e da NN_OVERTOPPING2, $q_{restantes formulações}$.

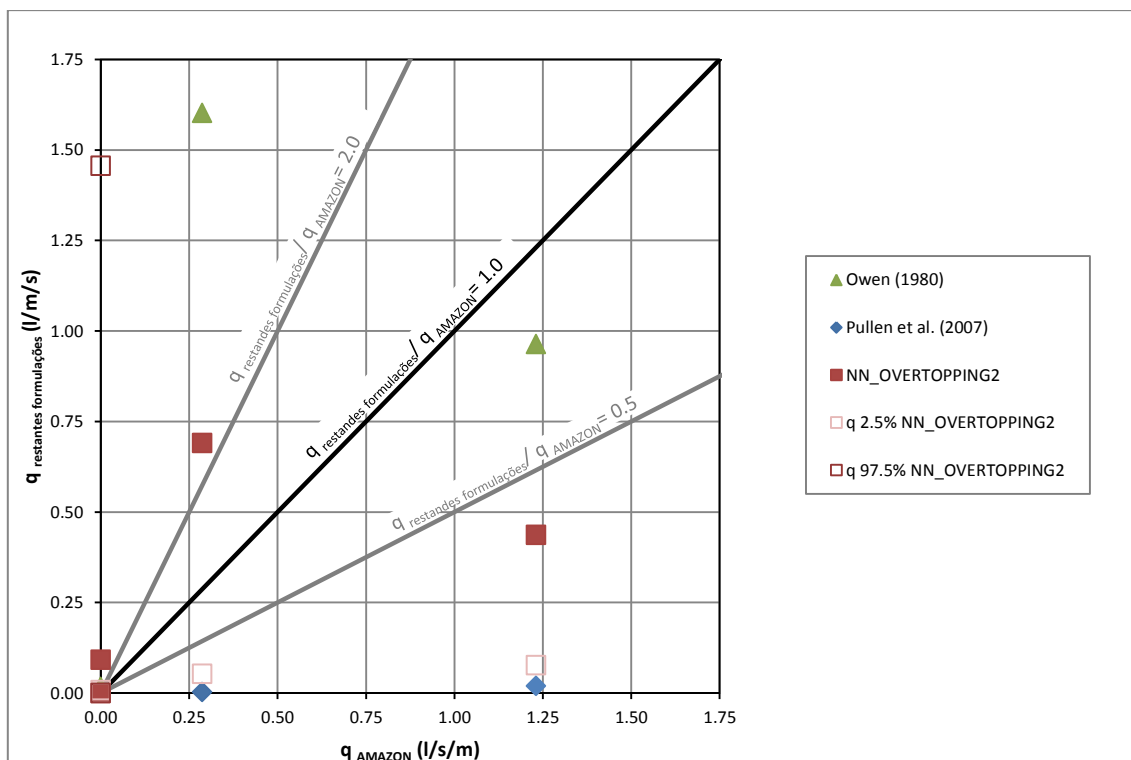


Figura 5.17 – Comparação entre os pequenos caudais médios galgados obtidos no modelo numérico AMAZON, q_{AMAZON} , e os pequenos caudais médios galgados obtidos através das formulações empíricas e da NN_OVERTOPPING2, $q_{restantes formulações}$.

Os resultados apresentados na Figura 5.16 e na Figura 5.17 permitem concluir que a formulação empírica de Owen (1980) (Besley, 1999) é que mais se aproxima dos valores simulados com o modelo AMAZON. Os resultados de caudal médio galgado calculados de acordo com a metodologia presente no “actual manual dos galgamentos” (Pullen et al., 2007) são sempre inferiores aos caudais obtidos no modelo numérico utilizado e também os que mais se afastam destes mesmos resultados.

No que se refere à ferramenta neuronal, constata-se que esta metodologia proporciona valores inferiores aos caudais obtidos com o modelo AMAZON, na gama de caudais maiores. Considerando os caudais menores não há nenhuma tendência bem definida. É de salientar que o intervalo de confiança de 95% dos caudais obtidos com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 apresenta um leque alargado de valores. Esta circunstância pode estar relacionada com a ausência na base de dados que suportou o treino das redes neuronais de estruturas e condições de agitação que coincidam com o caso estudado.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho incidiu sobre o estudo do fenómeno do galgamento em estruturas marítimas porosas, através da aplicação do modelo numérico AMAZON (Mariz et al., 2012), formulações empíricas e redes neuronais a um caso de estudo concreto – quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

O galgamento é um fenómeno complexo, que resulta da interacção onda-estrutura, envolvendo fenómenos transientes, não-lineares, com desenvolvimento de vórtices e turbulência, dificultando a sua análise e modelação (Brito, 2007). O galgamento é fortemente condicionado pela batimetria local, as condições de agitação, o nível do mar e a geometria da estrutura.

As simulações com o modelo AMAZON, baseado nas equações de água pouco profunda, em protótipo, mostraram que o valor do coeficiente de atrito linear, α , não influencia o caudal médio galgado. Seguidamente, testou-se a influência dos restantes parâmetros intervenientes na equação de Forchheimer. Verificou-se que a porosidade, n , é o parâmetro que mais condiciona o caudal médio galgado, seguindo-se o valor de IP em importância, em que IP é a velocidade máxima que o escoamento pode ter durante a transferência entre as camadas superficial e porosa da estrutura. O valor do coeficiente de atrito não linear, β , tem influência diminuta nos resultados. Estudou-se também o efeito da camada porosa (opções A e B). No caso da opção B, o valor de β deixava de ter influência para porosidades superiores.

Em relação às simulações levadas a cabo à escala 1:30, concluiu-se que o parâmetro α passa a ter influência. Não considerando a camada porosa obteve-se o valor mais elevado de caudal médio galgado. Comparando os resultados obtidos com as equações de Darcy e Forchheimer verificou-se que a primeira conduz a valores substancialmente superiores, o que pode estar relacionado com uma utilização desta equação fora do seu domínio de validade, ou seja o escoamento ser turbulento.

Como foi referido, não foi possível dispor de dados de campo. Deste modo, considerou-se que os caudais galgados obtidos no modelo AMAZON, após o ajuste dos parâmetros por comparação com o modelo numérico IH-2VOF (Mariz et al., 2012), baseado nas equações RANS (“Reynolds Average Navier-Stokes”), constituem valores de referência de caudal para comparação com as restantes metodologias.

A formulação de Owen (1980), presente em Besley (1999), é a formulação, entre as utilizadas, que origina resultados mais próximos dos caudais médios galgados obtidos através do modelo AMAZON. Por um lado, a geometria do caso de estudo assemelha-se à geometria que esteve na base da formulação de Owen (1980) e por outro lado, as condições de agitação seleccionadas encontram-se dentro dos limites de aplicação da formulação.

A metodologia proposta no “actual manual dos galgamentos” (Pullen et al., 2007) conduz a resultados francamente inferiores aos valores de referência utilizados. Nesta metodologia o período de onda não influencia o galgamento para as características da estrutura estudada (talude 2:3) e a geometria da

estrutura em estudo é também semelhante à estrutura da formulação. Porém, no caso da altura significativa ser igual a 1m, não se verificam as condições de aplicabilidade desta formulação.

Os resultados obtidos através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) são, para maiores caudais, inferiores aos valores de referência e para pequenos caudais não apresentam nenhuma tendência evidente. O intervalo de confiança de 95% tem grande abertura. Verificou-se também que a base de dados para as quais as redes neuronais foram treinadas (<http://www.clash.ugent.be/>) não inclui nenhuma estrutura que se assemelhe à estrutura em estudo.

Numa futura comparação do modelo AMAZON com observações de campo, sugere-se que primeiro se ajustem os valores de n e IP e, quando o caudal do modelo numérico for próximo do valor real observado, o ajuste final seja feito através de α e β .

Na transformação entre protótipo e modelo, o caso do IP surge como a maior incógnita, uma vez que esta variável, apesar de ter dimensões de velocidade, não corresponde a uma grandeza física concreta. Uma possível via para contornar esta dificuldade, consiste em obter o IP que melhor simula o protótipo (dados de campo) e o respectivo modelo (dados de laboratório), com o cuidado de n , α e β serem iguais no modelo numérico para as duas escalas. Estes dois valores de IP seriam confrontados com os que se obtêm com a semelhança de Froude e possíveis coeficientes de correcção estimados.

O facto de o modelo AMAZON ter apenas possibilidade de representar uma camada porosa pode não constituir desvantagem apreciável, pois segundo Mariz et al. (2012) o modelo IH-2VOF mostrou que a camada com maior influência no galgamento é a camada principal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battjes, J.A.; Groenendijk, H.W. (2000) – Wave height distributions on shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 40: 161-182.
- Besley, P. (1999) – *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*. Environment Agency, R&D Technical Report W178, Bristol, Reino Unido.
- Brito, S.F. (2007) – *Estudo do galgamento em estruturas marítimas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, Portugal
- CIRIA/CUR/CETMEF (2007) – *The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA Londres, Reino Unido.
- Clarke, S.; Dodd, N.; Damgaard, J. (2004) – Modelling flow in and above a porous beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(5):223-233.
- Coeveld, E.M.; Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B. (2005) – *Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2*, CLASH WP8 – Report.
- Dalrymple, R.A.; Rogers, B.D. (2006) - Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3): 141-147.
- Didier, E.; Ferreira, O.; Matias, A.; Neves, M.G.; Reis, M.T.; Pacheco, A. (2011) – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics para aplicação a estruturas costeiras. Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Delegação Portuguesa da PIANC. Porto, Portugal.
- Didier, E.; Neves, M.G. (2009) – Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56:496-500.
- Dodd, N. (1998) - Numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2):73-81.
- García, R.G. (2007) – *Análisis de la Funcionalidad y Estabilidad de Obras Marítimas Mediante un Modelo Numérico Basado en las Ecuaciones de Reynolds*. PhD Thesis, Universidade de Cantábria, Espanha.
- Hu, K.; Meyer, D. (2005) – The validity of the non-linear shallow water equations for modelling wave runup and reflection. *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, 195-206, Thomas Telford, Londres, Reino Unido.
- Hu, K. (2000) – *High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling*. PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, Manchester, Reino Unido.

Hu, K.; Mingham, C.G.; Causon, D.M. (2000) – Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 41(4), 433-465.

Lin, P.; Liu, P.L.-F. (1998) – A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359:239-264.

Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guanche, R.; Gonzalez-Ondina, J.M. (2008) – Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55(1):47-62.

Mariz, S.; Patrício, T.; Reis, M.T.; Neves, M.G.; Pires Silva, A. A.; Didier, E.; Hu, K. (2012) – Cálculo do galgamento no quebra-mar poente do Porto de Pesca de Albufeira: Aplicação dos modelos AMAZON e IH-2VOF. *Proc. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia*, Lisboa, Portugal.

Neves, M.G.; Reis, M.T.; Didier, E. (2010) – Comparisons of wave overtopping at coastal structures calculated with AMAZON, COBRAS-UC and SPHYSICS. *Proc. ECCOMAS CFD 2010, V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, LNEC, Lisboa, Portugal.

Neves, M.G.; Reis, M.T.; Losada, I.; Hu, K. (2008) – Wave over topping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(4):226-236.

<http://nn-overtopping.deltares.nl/> – NN_OVERTOPPING2 on-line – pesquisa feita em Dezembro de 2011.

<http://www.clash.ugent.be/> – base de dados das redes neuronais – pesquisa feita em Fevereiro de 2012.

<http://www.overtopping-manual.com/download/D41genericpredictionmethod2008.zip> – NN_OVERTOPPING2 para download – pesquisa feita em Dezembro de 2011.

Owen, M.W. (1980) – *Design of Sea Walls Allowing for Wave Overtopping*. Report EX 924, Hydraulics Research, Wallingford, Reino Unido.

Pozueta, B.; Van Gent, M.R.A; Van den Boogaard, H.; Medina, J.R. (2004) – Neural network modeling of wave overtopping at coastal structures. ASCE, *Proc. 29th ICCE*, Lisbon, Portugal.

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2003). *Use of Numerical Models of Wave Overtopping: A Summary of Current Understanding*. (<http://www.hrwallingford.co.uk>).

Pullen, T.; Allsop, N.W.H.; Bruce, T.; Kortenhaus, A.; Schuttrumpf, H.; Van der Meer, J.W. (2007) – *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Environment Agency, Reino Unido, Expertise Netwerk Waterkeren, Países Baixos, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, Alemanha.

Reis, M.T.; Hu, K.; Hedges, T.S.; Mase, H. (2008a) – A comparison of empirical, semiempirical, and numerical wave overtopping models. *Journal of Coastal Research*, 24(2B), 250–262.

Reis, M.T.; Hu, K.; Neves, M.G.; Hedges, T.S. (2008b) – Numerical modelling of breakwater overtopping using a NLSW equation model with a porous layer. *Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 3097-3109, World Scientific, Singapore.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K. (2009a) - Wave overtopping of a porous structure: numerical and physical modeling. *Journal of Coastal Research*, SI 56(II):539-543.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Hu, K.; Lopes, M.R.; Silva, L.G. (2009b) - Final rehabilitation of Sines west breakwater: physical and numerical modelling of overtopping. *Proc. ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters*, 636-647, Thomas Telford, Londres, Reino Unido.

Reis, M.T.; Neves, M.G. (2010) – 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, APRH/UNIVALI*, 10(4), 397-417.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Lopes, M.R.; Hu, K.; Silva, L.G. (2011) – Rehabilitation of Sines West Breakwater: wave overtopping study, *Maritime Engineering Journal, Proc. ICE*, 164(MA1), 15-32.

TAW (2002) – *Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken* (Technical report on wave run-up and wave overtopping at dikes - in Dutch). *Technical Advisory Committee on Water Defences*.

U. S. Army Corps of Engineers (USACE) (2006) – *Coastal Engineering Manual, Part VI*, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg.

Van Gent, M.R.A. (1994) – The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering*, 22:311-339.

Van Gent, M.R.A. (1996) – Numerical modeling of wave interaction with dynamically stable structures. *Proc. of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, Orlando, Florida, American Society of Civil Engineers (ASCE).

Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B.; Van den Boogaard, H. (2004) – *Report on WP8: Prediction Method. Neural network modelling of wave overtopping*. Deliverable D42 of European project CLASH (version 3).

ANEXOS

Anexo A – Ficheiros MATLAB® utilizados para tratamento da elevação da superfície livre

Neste anexo serão apresentados três m-files utilizados para tratar a elevação da superfície livre: o ficheiro “tratres.m” desenvolvido no âmbito do trabalho presente que recorre aos ficheiros base “gauges_interp.m”, que transforma a elevação da superfície livre em iguais intervalos de tempo através de interpolações; e o ficheiro “zero_crossing.m” que calcula os vários parâmetros que caracterizam a onda através do método do zero descendente. Os ficheiros “gauges_interp.m” e “zero_crossing.m” foram fornecidos pelo LNEC e o segundo foi ligeiramente alterado de modo a guardar automaticamente as figuras em ficheiros *.jpg e os resultados do período e altura de onda em ficheiros *.txt para cada sonda de modo a acelerar o tratamento de dados.

Apresenta-se, em seguida, o ficheiro “tratres.m”.

```
close all
clear all
clc
gauges_interp

yi1(isnan(yi1)) = []; %retira 'NaN' do vector yi1
yi2(isnan(yi2)) = []; %retira 'NaN' do vector yi2
yi3(isnan(yi3)) = []; %retira 'NaN' do vector yi3
yi4(isnan(yi4)) = []; %retira 'NaN' do vector yi4
yi5(isnan(yi5)) = []; %retira 'NaN' do vector yi5

zero_crossing1(yi1,10);
[RESULT1, NAME1]=zero_crossing(yi1,10);
zero_crossing2(yi2,10);
[RESULT2, NAME2]=zero_crossing(yi2,10);
zero_crossing3(yi3,10);
[RESULT3, NAME3]=zero_crossing(yi3,10);
zero_crossing4(yi4,10);
[RESULT4, NAME4]=zero_crossing(yi4,10);
zero_crossing5(yi5,10);
[RESULT5, NAME5]=zero_crossing(yi5,10);

% file3=input('Nome do ficheiro da Sonda 1: ','s');
% fid3=fopen(file3,'w');
fid3=fopen('Sonda1.txt','w');
fprintf(fid3,'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
fprintf(fid3,'\r\n');
fprintf(fid3,'%f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t',RESULT1);
status=fclose(fid3);

% file4=input('Nome do ficheiro da Sonda 2: ','s');
% fid4=fopen(file4,'w');
fid4=fopen('Sonda2.txt','w');
fprintf(fid4,'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
fprintf(fid4,'\r\n');
```

```

fprintf(fid4, '%f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t', RESULT2);
status=fclose(fid4);

% file5=input('Nome do ficheiro da Sonda 3: ', 's');
% fid5=fopen(file5, 'w');
fid5=fopen('Sonda3.txt', 'w');
fprintf(fid5, 'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
fprintf(fid5, '\r\n');
fprintf(fid5, '%f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t', RESULT3);
status=fclose(fid5);

% file6=input('Nome do ficheiro da Sonda 4: ', 's');
% fid6=fopen(file6, 'w');
fid6=fopen('Sonda4.txt', 'w');
fprintf(fid6, 'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
fprintf(fid6, '\r\n');
fprintf(fid6, '%f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t', RESULT4);
status=fclose(fid6);

% file7=input('Nome do ficheiro da Sonda 5: ', 's');
% fid7=fopen(file7, 'w');
fid7=fopen('Sonda5.txt', 'w');
fprintf(fid7, 'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
fprintf(fid7, '\r\n');
fprintf(fid7, '%f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t %f \t', RESULT5);
status=fclose(fid7);

hsig=[RESULT1(1,1) RESULT2(1,1) RESULT3(1,1) RESULT4(1,1) RESULT5(1,1)];

fid8=fopen('H_significant.txt', 'w');
% fprintf(fid8, 'H_significant \t H_mean \t H_10 \t \t H_max \t \t T_mean \t
T_s \t \t T_max \t \t T1_3 \n');
% fprintf(fid8, '\r\n');
fprintf(fid8, '%f \t %f \t %f \t %f \t %f', hsig);
status=fclose(fid8);

close all

```

Seguidamente apresenta-se o ficheiro "gauges_interp.m".

```
% Poe resultados do AMAZON em t igualmente espaçado

close all
clear all
tfinal=1000.;
tini=0.1;
ini=tini*1;
ifin=tfinal*1;
i=1;
file=input('Nome do ficheiro de dados: ','s');
%file = ['Sonda1_x0.txt']
% le ficheiro com t e eta
% while exist(file)==2
    a=load(file);
    x=a(1:end,1);
    % y=(a(1:end,2)-a(1,2));
    y1=(a(1:end,2));
    y2=(a(1:end,4));
    y3=(a(1:end,6));
    y4=(a(1:end,8));
    y5=(a(1:end,10));

%evitar repetições
    indices_repetidos = find(x(1:end-1) == x(2:end));
    x(indices_repetidos) = [];
    y1(indices_repetidos) = [];
    y2(indices_repetidos) = [];
    y3(indices_repetidos) = [];
    y4(indices_repetidos) = [];
    y5(indices_repetidos) = [];

%interpola
    xi=0.01:0.1:tfinal;
    % xi=xi';
    yi1=interp1(x,y1,xi);
    yi2=interp1(x,y2,xi);
    yi3=interp1(x,y3,xi);
    yi4=interp1(x,y4,xi);
    yi5=interp1(x,y5,xi);
    yy(1,:)=yi1;
    yy(2,:)=yi2;
    yy(3,:)=yi3;
    yy(4,:)=yi4;
    yy(5,:)=yi5;
%end

% Ficheiros de resultados
%cd ('C:\Documents and Settings\GNeves\My
Documents\Modelos\Cobras\Eric\Teste\')
file2=input('Nome do ficheiro de resultados: ','s');
fid2=fopen(file2,'w');
for j=1:length(xi)
    fprintf(fid2,'%8.5f,%8.5f,%8.5f,%8.5f,%8.5f \n',yy(:,j));
end
status=fclose(fid2);
```

Por fim, apresenta-se o ficheiro “zero_crossing1.m” que foi uma adaptação do ficheiro “zero_crossing.m” permitindo a gravação automática da figura da sonda 1. Os restantes ficheiros “zero_crossing*.m” são idênticos ao ficheiro “zero_crossing1.m” em que o número corresponde ao número da sonda em análise.

```
function [res,names,waves]=zero_crossing1(data,frequency,threshold)
% Zero crossing analysis of wave data
%
% ZERO_CROSSING (DATA, FREQUENCY)
% ZERO_CROSSING (DATA, FREQUENCY, THRESHOLD)
% RESULT = ZERO_CROSSING (...)
% [RESULT, NAMES] = ZERO_CROSSING (...)
%
% DATA is the input array of water elevation (a time column will be
% ignored). It can also be an cell array data. Any linear trend or
% mean will be removed. If PT data are used, the pressure attenuation
% must be corrected with PR_CORR before calling the present function.
% The optional third argument is the THRESHOLD for a crest or trough
% to be considered; if not given, a value of 1% of Hmax is assumed.
%
% Without output argument, the wave parameter are display on the
% screen and the histograms of wave height and wave period are
% plotted.
%
% With ONE output argument, RESULT is a structure with different fields:
% Significant wave height, Mean wave height, 1/10th wave height, Maximum
wave
% height, Mean wave period, Significant period and a table "wave" with
% following columns 1: wave heights, 2: periods.
% With TWO output argument, RESULT is an horizontal array (same results but
% without the table) and NAMES is an cell array with the name of the wave
parameters.

% written by Urs Neumeier
% version 1.06
%data=data1-mean(data1);           %rest the mean
error(nargchk(2,3,nargin))       % check argument
if frequency <= 0
    error('Frequency must be greather than zero')
end
if iscell(data)
    for i=1:length(data)
        if nargin==2
            [res(i,:),names]=zero_crossing(data{i},frequency);
        else
            [res(i,:),names]=zero_crossing(data{i},frequency,threshold);
        end
    end
end
return
end

if size(data,2)==2 & all(data(:,1)>720000) & all(data(:,2)<740000)
    data(:,1)=[];
end
% the function was written for zero upward-crossing.
% To have zero downward-crossing (recommended) leave the next line
uncommented
data=-data;
```



```

names={'H_significant','H_mean','H_10','H_max','T_mean','T_s','T_max','Tl_3
'}; % initialise output arguments
res=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN];

data=detrend(data); % find zero crossing avoiding zero
values
d0=data(data~=0);
back0=1:length(data);
back0=back0(data~=0);
f=find(d0(1:end-1).*d0(2:end)<0);
crossing=back0(f);
if data(1)>0 % reject first crossing if it is
downward
crossing(1)=[];
end
crossing=crossing(1:2:end); % this are the zero up-ward crossing,
se mudar para 2 apanho o outro
wave=zeros(length(crossing)-1,4); % calculate crest, trough and period of
each wave
% wave is a 4 columns matrix with wave height, wave crest, wave trough and
wave period
for i=1:length(crossing)-1
wave(i,2)=max(data(crossing(i):crossing(i+1)));
wave(i,3)=-min(data(crossing(i):crossing(i+1)));
end
if size(wave,1) >= 1 % if no wave was found, do nothing
wave(:,4)=diff(crossing')/frequency;
if nargin<3 % define threshold for wave
threshold=0.01*max(wave(:,2)+wave(:,3));
else
if threshold < 0
error('Wave threshold must not be negative')
end
end
i=0; % remove waves that are too small
while i < size(wave,1) % by joining then to adjacent wave
i=i+1;
if wave(i,2)<threshold
if i~=1
wave(i-1,2:4)=[max(wave(i-1:i,2:3)) sum(wave(i-1:i,4))];
end
wave(i,:)=[];
elseif wave(i,3)<threshold
if i~=size(wave,1)
wave(i,2:4)=[max(wave(i:i+1,2:3)) sum(wave(i:i+1,4))];
wave(i+1,:)=[];
else
wave(i,:)=[];
end
end
end
end

% wave has 1: wave height, 2: wave crest (Hcm), 3: wave trough (Htm),
4: period.
wave(:,1)=sum(wave(:,2:3)')'; % now we have all waves to be
considered, calculation of height
nb=size(wave,1); % calculation of the wave
statistics
wave_unsorted=wave;
T_sorted=sort(wave(:,4));
wave=sortrows(wave); % in ascending order

```

```

wave=flipud(wave);           % in descending order
old_warning_state=warning('off');
res(1)=mean(wave(1:round(nb*1/3),1)); % H_significant
res(2)=mean(wave(:,1));        % H_mean
res(3)=mean(wave(1:round(nb*0.1),1)); % H_10
res(4)=max(wave(:,1));        % H_max
res(5)=mean(wave(:,4));       % mean_period
res(6)=mean(wave(1:round(nb*1/3),4)); % T_significant (based on H1/3)
res(7)=max(wave(:,4));        % T_max
res(8)=mean(T_sorted);        % T_significant (T1/3)
warning(old_warning_state);
end

if nargin==0                    % if no output argument, display
    results

    fprintf(['Significant wave height %g\n'...
            'Mean wave height           %g\n'...
            '1_10 wave height          %g\n'...
            'Maximum wave height       %g\n'...
            'Mean wave period          %g\n'...
            'Significant period        %g\n'...
            'Maximum period            %g\n'...
            'T1_3                      %g\n'],res);
    handle=figure;

    if nb<100
        nb_bin=10;
    elseif nb<150
        nb_bin=15;
    else
        nb_bin=20;
    end
    subplot(2,1,1);
    hist(wave(:,1),nb_bin)
    set(gca,'ytick',nb*(0:0.05:1),'yticklabel',sprintf('%d%%|',0:5:100))
    title 'wave height'
    subplot(2,1,2);
    hist(wave(:,4),nb_bin)
    set(gca,'ytick',nb*(0:0.05:1),'yticklabel',sprintf('%d%%|',0:5:100))
    title 'wave period'
    clear res names
    %   grafname=input('Nome do ficheiro gráfico da sonda em análise: ');
    saveas(handle,'Sonda1.jpg');
else
    if nargin==1
        s=setfield([],names{1},res(1));
        for i=2:length(res)
            s=setfield(s,names{i},res(i));
        end
        s.wave=wave_unsorted(:,[1 4]);
        res=s;
        clear names
    end
end
end

```

Anexo B – Exemplo da introdução de dados no modelo AMAZON

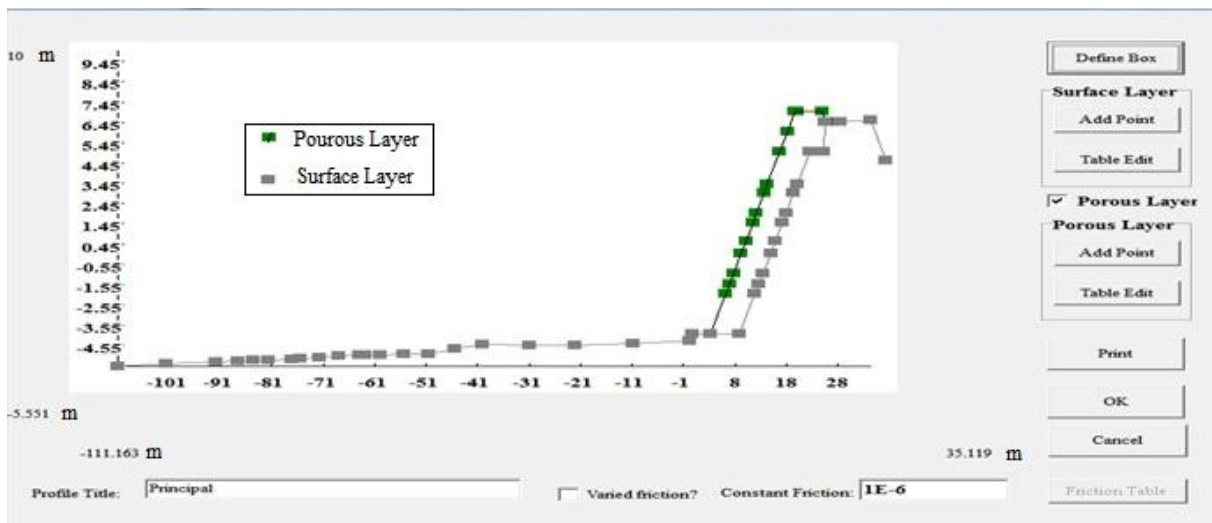


Figura B. 1 – Definição da Geometria da estrutura – opção A.

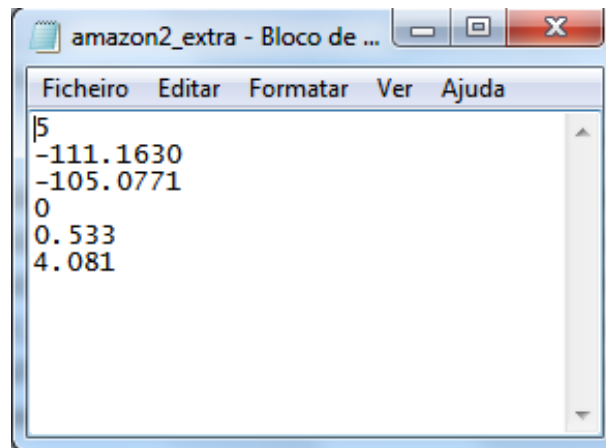


Figura B. 2 – Ficheiro de sondas do modelo AMAZON para T= 12s.

Run Title:

Enter Wave and Sea Level Conditions:

Wave Height (Hs): m Wave Spectrum:

Wave Period (T): s Gamma: Water depth (TMA only): m

Mean Sea Level: m

Enter Grid Resolution and Friction

Non-uniform Grid Uniform Grid Resolution:

Bottom friction applied

Enter Wave Number

Wave Numbers: Warming-up time (in wave number):

Define Observing Points

Point One: m Point Two: m

Drainage

Location: m Capacity: m³/s

Define Observing Points

Tidal boundary applied

Tidal Range: m Tidal Period: hrs Tidal Phase: 0 - 1

Computing Parameters

Minimum wet depth: m Minimum friction depth: m

Define Porous Layer

Porous layer applied

Porous Equations:

Interface Permeability: m/s

Porosity: 0 - 1

Rock diameter: m

Alpha:

Beta:

Figura B. 3 – Definição dos parâmetros da simulação para o exemplo (+3.5m (ZH), H= 4m, T= 12s, ondulação regular – “Sinusoid” – equação de Forchheimer, IP= 0.3m/s, n= 0.35, D₅₀= 1.6m, α= 1500 e β= 0.9).

Anexo C – Resultados do caudal médio galgado, q , calculados através do modelo AMAZON

Tabela C. 1 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H= 4m$, $T= 10s$, ondulação regular, equação de Forchheimer, $D_{50}= 1.6m$, $\alpha= 1100$, com a opção A em protótipo e através do modelo AMAZON.

	n= 0.30			n= 0.35			n= 0.40		
$\beta= 0.55$	IP_{max}= 1.04873 m/s			IP_{max}= 1.37161 m/s			IP_{max}= 1.74435 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}
	0.1	0.2309103	2.83975	0.1	0.2297684	2.82899	0.1	0.2298971	2.82645
	0.2	0.0928972	2.81945	0.2	0.0764215	2.77626	0.2	0.0703076	2.77933
	0.3	0.0390680	2.80149	0.3	0.0097322	2.78991	0.3	0.0001271	2.76406
	0.4	0.0188670	2.81845	0.4	0.0000000	2.81005	0.4	0.0000000	2.79738
	0.5	0.0064567	2.84187						
	0.6	0.0000000	2.84348						
$\beta= 0.90$	IP_{max}= 0.81991 m/s			IP_{max}= 1.07230 m/s			IP_{max}= 1.36369 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}
	0.1	0.2348703	2.83412	0.1	0.2296648	2.83969	0.1	0.2297107	2.82787
	0.2	0.1215086	2.83575	0.2	0.0874038	2.80296	0.2	0.0747131	2.7754
	0.3	0.0637347	2.81134	0.3	0.0289487	2.80340	0.3	0.0065639	2.78918
	0.4	0.0435736	2.82725	0.4	0.0087417	2.81652	0.4	0.0000000	2.81026
	0.5	0.0257621	2.83951	0.5	0.0000000	2.84100			
	0.6	0.0143563	2.83667						
	0.7	0.0000000	2.83443						
$\beta= 1.10$	IP_{max}= 0.74166 m/s			IP_{max}= 0.96996 m/s			IP_{max}= 1.23352 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m}
	0.1	0.2382375	2.83479	0.1	0.2303733	2.83811	0.1	0.2298209	2.82971
	0.2	0.1349683	2.83756	0.2	0.0939377	2.82013	0.2	0.0777811	2.78314
	0.3	0.0825063	2.81603	0.3	0.0394504	2.81095	0.3	0.013672	2.79621
	0.4	0.0550991	2.83263	0.4	0.0171314	2.82067	0.4	0.0000000	2.81306
	0.5	0.0318366	2.84003	0.5	0.0051705	2.84088			
	0.6	0.0196976	2.83370	0.6	0.0000000	2.84024			
	0.74166	0.0000000	2.82963						

Tabela C. 2 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H= 4m$, $T= 10s$, ondulação regular, equação de Forchheimer, $D_{50}= 1.6m$, $\alpha= 1500$, com a opção A em protótipo e através do modelo AMAZON.

	n= 0.30			n= 0.35			n= 0.40		
$\beta= 0.55$	$IP_{max}= 1.04857\ m/s$			$IP_{max}= 1.37146\ m/s$			$IP_{max}= 1.74421\ m/s$		
	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$
	0.1	0.2309299	2.83939	0.1	0.2297988	2.82885	0.1	0.2299193	2.82703
	0.2	0.0929628	2.81897	0.2	0.0764250	2.77637	0.2	0.0703324	2.77986
	0.3	0.0390380	2.80245	0.3	0.0098010	2.78981	0.3	0.0001341	2.76417
	0.4	0.0189528	2.81845	0.4	0.0000000	2.81002	0.4	0.0000000	2.79730
	0.5	0.0065509	2.84182						
	0.6	0.0000000	2.84344						
$\beta= 0.90$	$IP_{max}= 0.81981\ m/s$			$IP_{max}= 1.07221\ m/s$			$IP_{max}= 1.36360\ m/s$		
	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$
	0.1	0.2348891	2.83417	0.1	0.2296884	2.83885	0.1	0.2297327	2.82773
	0.2	0.1215544	2.83589	0.2	0.0874041	2.8031	0.2	0.0747097	2.77492
	0.3	0.0639064	2.81154	0.3	0.0290141	2.8035	0.3	0.0065824	2.78925
	0.4	0.0436244	2.82708	0.4	0.0086694	2.81635	0.4	0.0000000	2.81012
	0.5	0.0258076	2.83953	0.5	0.0000000	2.84106			
	0.6	0.0143709	2.83652						
	0.7	0.0000000	2.83460						
$\beta= 1.10$	$IP_{max}= 0.74158\ m/s$			$IP_{max}= 0.96988\ m/s$			$IP_{max}= 1.23345\ m/s$		
	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$	IP (m/s)	$q\ (m^3/s/m)$	$H_{s\ x=0m}$
	0.1	0.2382527	2.83454	0.1	0.2303815	2.83801	0.1	0.2298123	2.82957
	0.2	0.1349479	2.83737	0.2	0.0939564	2.82046	0.2	0.0777764	2.78362
	0.3	0.0825433	2.81597	0.3	0.0394902	2.81073	0.3	0.0136760	2.79686
	0.4	0.0548601	2.83212	0.4	0.0172047	2.82114	0.4	0.0000000	2.81315
	0.5	0.0318763	2.83976	0.5	0.0051818	2.84114			
	0.6	0.0196679	2.83364	0.6	0.0000000	2.84034			
	0.74158	0.0000000	2.82949						

Tabela C. 3 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H= 4m$, $T= 10s$, ondulação regular, equação de Forchheimer, $D_{50}= 1.6m$, $\alpha= 1800$, com a opção A em protótipo e através do modelo AMAZON.

	n= 0.30			n= 0.35			n= 0.40		
$\beta= 0.55$	IP_{max}= 1.04845 m/s			IP_{max}= 1.37135 m/s			IP_{max}= 1.74411 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2309537	2.83905	0.1	0.2298399	2.82886	0.1	0.2299340	2.82671
	0.2	0.0930005	2.81915	0.2	0.0764378	2.77614	0.2	0.0703577	2.77963
	0.3	0.0392264	2.80159	0.3	0.0098143	2.78952	0.3	0.0001289	2.76355
	0.4	0.0189147	2.81847	0.4	0.0000000	2.80993	0.4	0.0000000	2.79734
	0.5	0.0065931	2.84175						
	0.6	0.0000000	2.84351						
$\beta= 0.90$	IP_{max} = 0.81974 m/s			IP_{max}= 1.07214 m/s			IP_{max}= 1.36354 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2349064	2.83425	0.1	0.2297020	2.83929	0.1	0.2297320	2.82811
	0.2	0.1215709	2.83601	0.2	0.0874130	2.80320	0.2	0.0747579	2.77637
	0.3	0.0638744	2.81153	0.3	0.0290221	2.80354	0.3	0.0066487	2.78939
	0.4	0.0436410	2.82724	0.4	0.0087162	2.81632	0.4	0.0000000	2.80986
	0.5	0.0258098	2.83947	0.5	0.0000000	2.84087			
	0.6	0.0143960	2.83656						
	0.7	0.0000000	2.83441						
$\beta= 1.10$	IP_{max}= 0.74152 m/s			IP_{max}= 0.96983 m/s			IP_{max}= 1.23340 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2382665	2.83477	0.1	0.2304137	2.83800	0.1	0.2298199	2.82968
	0.2	0.1349953	2.83792	0.2	0.0939565	2.82066	0.2	0.0777939	2.78350
	0.3	0.0826350	2.81580	0.3	0.0395021	2.81100	0.3	0.0137510	2.79667
	0.4	0.0550930	2.83226	0.4	0.0171809	2.82112	0.4	0.0000000	2.81297
	0.5	0.0319349	2.83928	0.5	0.0052525	2.84091			
	0.6	0.0196920	2.83346	0.6	0.0000000	2.84030			
	0.74152	0.0000000	2.82929						

Tabela C. 4 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H= 4m$, $T= 12s$, ondulação regular, equação de Forchheimer, $D_{50}= 1.6m$, $\alpha= 1500$, com a opção A em protótipo e através do modelo AMAZON.

	n= 0.30			n= 0.35			n= 0.40		
$\beta= 0.55$	IP _{max} = 1.04857 m/s			IP _{max} = 1.37146 m/s			IP _{max} = 1.74421 m/s		
	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)
	0.1	0.3762537	3.412081	0.1	0.3735555	3.410872	0.1	0.3722628	3.398367
	0.2	0.2397732	3.392519	0.2	0.2098505	3.378639	0.2	0.1996490	3.376704
	0.3	0.1728727	3.342499	0.3	0.1051544	3.320960	0.3	0.0810513	3.310530
	0.4	0.1225216	3.269552	0.4	0.0494289	3.224148	0.4	0.0162235	3.183336
	0.5	0.0861113	3.232237	0.5	0.0341538	3.169955	0.5	0.0000000	3.172696
	0.6	0.0611768	3.227122	0.6	0.0175449	3.168950			
	0.7	0.0426440	3.232777	0.7	0.0042692	3.168401			
	0.8	0.0260921	3.240227	0.8	0.0000000	3.166403			
	0.9	0.0142036	3.246265						
	1.04857	0.0000000	3.242169						
$\beta= 0.90$	IP _{max} = 0.81981 m/s			IP _{max} = 1.07221 m/s			IP _{max} = 1.36360 m/s		
	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)
	0.1	0.3782982	3.424404	0.1	0.3713023	3.413288	0.1	0.3728752	3.408523
	0.2	0.2701813	3.378540	0.2	0.2234649	3.391126	0.2	0.2052483	3.377855
	0.3	0.2080165	3.347196	0.3	0.1459505	3.335285	0.3	0.0947656	3.311994
	0.4	0.1730837	3.290036	0.4	0.0951678	3.253021	0.4	0.0393613	3.216145
	0.5	0.1340347	3.280869	0.5	0.0618210	3.211309	0.5	0.0236736	3.172520
	0.6	0.0945927	3.284630	0.6	0.0493292	3.205457	0.6	0.0091681	3.171764
	0.7	0.068328	3.293886	0.7	0.0290869	3.209157	0.7	0.0000000	3.169863
	0.81981	0.044537	3.306405	0.8	0.0153527	3.214626			
			0.9	0.0000036	3.213883				
			1.07221	0	3.211779				
$\beta= 1.10$	IP _{max} = 0.74158 m/s			IP _{max} = 0.96988 m/s			IP _{max} = 1.23345 m/s		
	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m ³ /s/m)	H _{s x=0m} (m)
	0.1	0.3804393	3.430146	0.1	0.3723169	3.415818	0.1	0.3710382	3.411673
	0.2	0.3023166	3.375753	0.2	0.2348509	3.390692	0.2	0.2089994	3.380168
	0.3	0.2210717	3.354511	0.3	0.1630957	3.332910	0.3	0.1065310	3.317791
	0.4	0.1908316	3.303983	0.4	0.1200108	3.262586	0.4	0.0529441	3.228605
	0.5	0.1500755	3.302910	0.5	0.0838288	3.231451	0.5	0.0378802	3.173372
	0.6	0.1104937	3.306011	0.6	0.0604777	3.228366	0.6	0.0202403	3.172783
	0.74158	0.0693805	3.324969	0.7	0.0399409	3.235782	0.7	0.0062479	3.171599
				0.8	0.0245719	3.246158	0.8	0.0000000	3.169077
			0.9	0.0126468	3.253746				
			0.96988	0.0024830	3.253658				

Tabela C. 5 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H= 4m$, $T= 10s$, ondulação regular, equação de Forchheimer, $D_{50}= 1.6m$, $\alpha= 1500$, com a opção B em protótipo e através do modelo AMAZON.

	n= 0.30			n= 0.35			n= 0.40		
$\beta= 0.55$	IP_{max}= 1.01522 m/s			IP_{max}= 1.32785 m/s			IP_{max}= 1.68878 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2303223	2.834609	0.1	0.2297276	2.842763	0.1	0.2290803	2.850576
	0.2	0.0719825	2.799112	0.2	0.0725511	2.785975	0.2	0.0726324	2.804150
	0.3	0.0040437	2.774124	0.3	0.0000324	2.805310	0.3	0.0000605	2.819550
	0.4	0.0000000	2.806675	0.4	0.0000000	2.824675	0.4	0.0000000	2.836713
$\beta= 0.90$	IP_{max}= 0.79374 m/s			IP_{max}= 1.03813 m/s			IP_{max}= 1.32027 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2296033	2.827814	0.1	0.2293380	2.823717	0.1	0.2292485	2.837692
	0.2	0.0805109	2.800558	0.2	0.0716407	2.787538	0.2	0.0726333	2.795484
	0.3	0.0206997	2.777742	0.3	0.0001090	2.784546	0.3	0.0001628	2.812213
	0.4	0.0062563	2.801905	0.4	0.0000000	2.812931	0.4	0.0000000	2.845066
	0.5	0.0000000	2.827648						
$\beta= 1.10$	IP_{max}= 0.71800 m/s			IP_{max}= 0.93906 m/s			IP_{max}= 1.19426 m/s		
	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x=0m} (m)
	0.1	0.2295683	2.829768	0.1	0.2295908	2.825914	0.1	0.2292459	2.825734
	0.2	0.0871591	2.802607	0.2	0.0715934	2.781318	0.2	0.0723372	2.791284
	0.3	0.0307940	2.781601	0.3	0.0000174	2.770521	0.3	0.0002759	2.802621
	0.4	0.0157625	2.804407	0.4	0.0000000	2.807692	0.4	0.0000000	2.835195
	0.5	0.0084189	2.835830						
0.6	0.0000000	2.829350							

Tabela C. 6 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +0.1167m (ZH), $H= 0.133m$, $T= 2.19s$, ondulação regular, calculados com as equações de Forchheimer e de Darcy e considerando a estrutura impermeável através do modelo AMAZON, na opção A.

Forchheimer - $n= 0.35$; $\alpha= 1100$; $\beta= 0.9$			Forchheimer - $n= 0.35$; $\alpha= 1500$; $\beta= 0.9$			Forchheimer - $n= 0.35$; $\alpha= 1500$; $\beta= 1.1$		
$IP_{max}= 0.19577$ m/s			$IP_{max}= 0.19576$ m/s			$IP_{max}= 0.17708$ m/s		
IP (m/s)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)	IP (m/s)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)	IP (m/s)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)
0.018257	0.0022851	0.113059	0.018257	0.0022683	0.113136	0.018257	0.0022823	0.113264
0.0200	0.0021745	0.112904	0.0200	0.0021751	0.112953	0.0200	0.0021756	0.113124
0.0250	0.0018807	0.112440	0.0250	0.0018928	0.11258	0.0250	0.0019089	0.112879
0.0350	0.0014120	0.112499	0.0350	0.0014434	0.112613	0.0350	0.0014777	0.113054
0.0500	0.0009287	0.110731	0.0500	0.0009811	0.110871	0.0500	0.0010458	0.111039
0.0750	0.0003924	0.107965	0.0750	0.0004810	0.108236	0.0750	0.0006170	0.108481
0.1000	0.0002786	0.106177	0.1000	0.0003152	0.106542	0.1000	0.0003279	0.1072050
0.1250	0.0001134	0.106129	0.1250	0.0001507	0.106634	0.1250	0.0002008	0.1075010
0.1500	0.0000000	0.106232	0.1500	0.0000301	0.107101	0.1500	0.0000706	0.1082020
			0.1750	0.0000000	0.106850	0.1750	0.0000000	0.1079250
Forchheimer - $n= 0.40$; $\alpha= 1500$; $\beta= 0.9$			Darcy - $n= 0.35$			Impermeável		
$IP_{max}= 0.24896$ m/s								
IP (m/s)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)	IP=RP ^(*) (m/s)	q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)		q ($m^3/s/m$)	$H_{s\ x=0m}$ (m)
0.018257	0.0022722	0.112917	0.018257	0.0034436	0.116338		0.0038252	0.116265
0.0200	0.0021667	0.112662	0.0200	0.0034183	0.116217		0.0038252	0.116265
0.0250	0.0018581	0.111919	0.0250	0.0033174	0.116358			
0.0350	0.0013413	0.111674	0.0350	0.0031502	0.116526			
0.0500	0.0007285	0.110833	0.0500	0.0028113	0.116451			
0.0750	0.0002160	0.107319	0.0750	0.0022020	0.116394			
0.1000	0.0000525	0.104517	0.1000	0.0016040	0.116105			
0.1250	0.0000000	0.103852	0.1250	0.0011084	0.115724			
			0.1500	0.0006962	0.115769			
			0.1750	0.000362	0.115542			
			0.2000	0.0001524	0.115312			
			0.2250	0.0000463	0.114391			
			0.2500	0.0000000	0.112880			

(*) em que RP é velocidade máxima que o escoamento pode ter na camada porosa ("Rock Permeability").

Tabela C. 7 – Resultados do caudal médio galgado, q , e altura significativa no pé do talude, $H_{s\ x=0m}$, para +3.5m (ZH), $H=4m$, $T=12s$, ondulação regular, calculados com as equações de Forchheimer, através do modelo AMAZON, na opção A, à escala 1:30 e protótipo.

n= 0.35; $\alpha= 1500$; $\beta= 0.90$; Protótipo			n= 0.35; $\alpha= 1500$; $\beta= 0.90$; Modelo "escalado" para protótipo			n= 0.40 $\alpha= 1500$; $\beta= 0.90$; Protótipo		
IP_{max}= 1.07221 m/s			IP_{max}= 1.07221 m/s			IP_{max}= 1.36360 m/s		
IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)
0.1	0.3713023	3.413288	0.10	0.3727197	3.39408	0.1	0.3728752	3.408523
0.2	0.2234649	3.391126	0.11	0.3574054	3.38859	0.2	0.2052483	3.377855
0.3	0.1459505	3.335285	0.14	0.3110188	3.37740	0.3	0.0947656	3.311994
0.4	0.0951678	3.253021	0.19	0.2371748	3.37839	0.4	0.0393613	3.216145
0.5	0.0618210	3.211309	0.27	0.1612112	3.32613	0.5	0.0236736	3.172520
0.6	0.0493292	3.205457	0.41	0.0790364	3.24708	0.6	0.0091681	3.171764
0.7	0.0290869	3.209157	0.55	0.0517926	3.19626	0.7	0.0000000	3.169863
0.8	0.0153527	3.214626	0.68	0.0247625	3.19902			
0.9	0.0000036	3.213883	0.82	0.0049459	3.21303			
1.07221	0.0000000	3.211779	0.96	0.0000000	3.20550			
n= 0.35; $\alpha= 1500$; $\beta= 1.10$; Protótipo			n= 0.35; $\alpha= 1500$; $\beta= 1.10$; Modelo "escalado" para protótipo			n= 0.40; $\alpha= 1500$; $\beta= 0.90$; Modelo "escalado" para protótipo		
IP_{max}= 0.96988 m/s			IP_{max}= 0.96988 m/s			IP_{max}= 1.36360 m/s		
IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)
0.1	0.3723169	3.415818	0.10	0.3750202	3.39792	0.10	0.3733606	3.38751
0.2	0.2348509	3.390692	0.11	0.3574876	3.39372	0.11	0.3560251	3.37986
0.3	0.1630957	3.332910	0.14	0.3136643	3.38637	0.14	0.3053170	3.35757
0.4	0.1200108	3.262586	0.19	0.2428109	3.39162	0.19	0.2203981	3.35022
0.5	0.0838288	3.231451	0.27	0.1718425	3.33117	0.27	0.1197048	3.32499
0.6	0.0604777	3.228366	0.41	0.1013834	3.25443	0.41	0.0354924	3.21957
0.7	0.0399409	3.235782	0.55	0.0538795	3.21615	0.55	0.0086266	3.13551
0.8	0.0245719	3.246158	0.68	0.0329948	3.22503	0.68	0.0000000	3.11556
0.9	0.0126468	3.253746	0.82	0.0116008	3.24606			
0.96988	0.0024830	3.253658	0.96	0.0000000	3.23775			
n= 0.35; $\alpha= 1100$; $\beta= 0.90$; Protótipo			n= 0.35; $\alpha= 1100$; $\beta= 0.90$; Modelo "escalado" para protótipo					
IP_{max}= 1.07230 m/s			IP_{max}= 1.07230 m/s					
IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)	IP (m/s)	q (m³/s/m)	H_{s x = 0m} (m)			
0.1	0.3712750	3.413405	0.10	0.3754802	3.39177			
0.2	0.2234657	3.390976	0.11	0.3573068	3.38712			
0.3	0.1458767	3.334951	0.14	0.3090305	3.37320			
0.4	0.0950438	3.253154	0.19	0.2320153	3.37497			
0.5	0.0617494	3.211234	0.27	0.1526010	3.32193			
0.6	0.0492891	3.205343	0.41	0.0644779	3.23895			
0.7	0.0290683	3.209133	0.55	0.0457787	3.18531			
0.8	0.0152996	3.214621	0.68	0.0186335	3.18387			
0.9	0.0000037	3.214215	0.82	0.0000000	3.18696			
1.0	0.0000000	3.210228						

Anexo D – Exemplo da introdução de dados na folha de cálculo da formulação empírica de Owen (1980)

Tabela D. 1 – Exemplo de introdução (+3.5m (ZH), H= 4m, Tp= 12s) na folha de cálculo para obtenção do caudal médio galgado através da formulação empírica de Owen (1980).

β	=	0	angle of wave attack to the normal (degrees)
Or	=	-	ratio of discharge under angled wave attack to that under normal wave attack
A	=	0.00884	empirically derived coefficients
B	=	19.9	empirically derived coefficients
Cr	=	-	reduction factor
Gc	=	5.875	crest berm width (m)
g	=	9.81	acceleration due to gravity (m/s ²)
Hs	=	4.0	the significant wave height at the toe of the wall (m)
Q	=	-	discharge parameter (dimensionless)
Q	=	-	the mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (m ³ /s/m)
Rc	=	3.5	freeboard (height of the crest of the wall above still water level) (m)
R	=	-	dimensionless crest freeboard
γf	=	0.5	roughness coefficient
Tm	=	10.00	the mean wave period at the toe of the structure (s)
Parameters			
Or	=	$1 - 0.000152 \beta^2$	valid for 0° < β < 60°
R	=	$Rc / (Tm (g Hs)^{0.5})$	
Q	=	$A \text{ EXP } (-B R / r)$	valid for 0.05 < R < 0.30
Qi	=	$Q (Tm g Hs)$	
(impermeable)	=	$Q (Tm g Hs)$	
if crest berm is permeable also then			
Cr	=	$3.06 \text{ exp } (-1.5 Gc / Hs)$	when Gc/Hs < 0.75 assume Cr = 1
Qp (permeable)	=	$Qi Cr$	
Equations			
Or	=	NORMAL WAVE ATTACK	
R	=	0.0558732	
Q	=	0.000956508	
Qi	=	SEE BELOW	
if crest berm is also permeable then enter 2, if not enter 1		2	
Gc/Hs	=	1.46875	
Cr	=	0.337999763	
Qp	=	0.12686267	
Calculations			Result
			Q (l/s/m) 126.86

Type 3 Instructions:

A and B are empirically derived coefficients which depend on the profile of the seawall, (see above table).

r is a roughness coefficient, (see above table).

To take account of a permeable crest berm Gc, a reduction factor Cr is determined and then Qp is = Qi x Cr

When Cr / Hs < 0.75 assume that Cr= 1.

Coefficients For Simply Sloping Seawalls		
Seawall Slope	A	B
1:1	0.0079	20.1
1:1.5	0.0088	19.9
1:2	0.0094	21.6
1:2.5	0.0103	24.5
1:3	0.0109	28.7
1:3.5	0.0112	34.1
1:4	0.0116	41
1:4.5	0.012	47.7
1:5	0.0131	55.6

Type of Wall	Roughness Coefficient, r
smooth concrete or asphalt	1
smooth concrete blocks with little or no drainage	1
stone blocks, pitched or mortared	0.95
stepped	0.95
turf	0.9-1
one layer of rock armour on impermeable base	0.8
one layer of rock armour on permeable base	0.55-0.6
two layers of rock armour	0.5-0.55

Anexo E – Exemplo da introdução de dados para obtenção do caudal médio galgado, segundo Pullen et al. (2007)

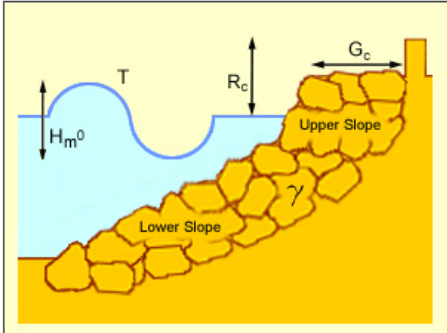
Calculation Tool

[Home](#) [European Overtopping Manual](#) [Calculation Tool](#) [Partners](#) [Links](#) [Events](#) [Contact](#)

Introduction
Empirical Methods
PC Overtopping
Neural Network

Armoured Composite Slope with Crest Berm

Method Selection Probabilistic Deterministic



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (Vs/m)


17.899


T (wave period) s Tm Tp Tm-1,0

Hm0 (Wave Height at the Toe of the Structure) m

Rc (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

Gc (The width of the structure crest) m

Lower Slope
 (e.g. 1 in 2)  in

Upper Slope
 (e.g. 1 in 2)  in

Y (coefficient for reduction factors)

Terms & Conditions
About this Website

Figura E. 1 – Exemplo de introdução (+3.5m (ZH), H= 4m, Tp= 12s) na folha de cálculo para obtenção do caudal médio galgado segundo Pullen et al. (2007).

Anexo F – Exemplo da introdução de dados para obtenção do caudal médio galgado, na NN_OVERTOPPING2

```

!-----
! Begin input file
! NN_OVERTOPPING_1.INP
! This is a comment record
! =====
! COLUMN#01 Angle of Wave attack
! COLUMN#02 Water depth in front of structure
! COLUMN#03 Significant Wave Height at the toe of structure
! COLUMN#04 Wave period
! COLUMN#05 Water depth at the toe of structure
! COLUMN#06 Width of toe
! COLUMN#07 Roughness coefficient
! COLUMN#08 Angle of down slope
! COLUMN#09 Angle of upper slope
! COLUMN#10 Crest Freeboard in relation to SWL
! COLUMN#11 Berm Width
! COLUMN#12 Water depth at the berm of the structure
! COLUMN#13 Berm slope
! COLUMN#14 Armour Freeboard in relation to SWL
! COLUMN#15 Armour Width
! =====
! and this is another comment record
* as well as this one, and the next five ones
!-----
!   1     2     3     4     5     6     7     8     9     10    11    12    13    14    15
!   β     ds  Hm0  Tm-1,0  ht  Bt  γf  cotαd  cotαu  Rc  B  hb  CotαB  Ac  Gc
!   °     m   toe(m)  toe(s)  m   m           m           m           m   m   m           m   m
!
!-----
!Nível +3.5m (ZH); Tp= 12s =>Tm-1,0= 10.9091s
  0.000  7.816   1  10.90909  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   2  10.90909  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   3  10.90909  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   4  10.90909  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
!
!Nível +3.5m (ZH); Tp= 10s =>Tm-1,0= 9.09091s
  0.000  7.816   1   9.09091  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   2   9.09091  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   3   9.09091  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875
  0.000  7.816   4   9.09091  7.816  0.000  0.500  1.500  1.500  3.0  0.000  0.000  0.000  3.5  5.875

```