



**José de Jesus Joaquim Gaspar**

## **Estudo do galgamento em estruturas marítimas verticais utilizando o modelo numérico AMAZON**

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Maria Teresa Reis, Doutora, LNEC

Coorientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,  
Professora Doutora, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Vogais: Prof. Doutora Ana Cristina Mendonça

Prof. Doutora Maria da Graça Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio, 2016**

“Copyright” José de Jesus Joaquim Gaspar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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



## **Agradecimentos**

Fruto de muito trabalho, finalizo uma etapa importante da minha vida agradecendo a todos que me apoiaram nesta jornada e contribuíram para a realização desta dissertação.

À Dra. Maria Teresa Reis e à Dra. Maria da Graça Neves, pela oportunidade de trabalhar nesta dissertação, pela orientação cuidadosa, pelas críticas construtivas, pela total disponibilidade e amizade em todos os momentos, pela ajuda, incentivo, transmissão de conhecimento, paciência e sugestões fundamentais para a realização desta dissertação, muito obrigado.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo espaço e material fornecido, permitindo-me trabalhar.

Aos funcionários do departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, pela forma como me receberam e simpatia demonstrada durante o tempo que lá estive.

Um importante agradecimento a minha família pelo apoio, amparo e motivação constante.



*“The most important thing is to keep the most important thing the most important thing.”*  
(Donald P. Coduto)



## Resumo

O galgamento oceânico é um fenómeno associado à interação de ondas com estruturas marítimas. Nesta dissertação estudou-se o galgamento em estruturas marítimas verticais através da aplicação do modelo numérico AMAZON, que é um modelo bidimensional, baseado na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas. Para validar a sua aplicação a estruturas marítimas verticais impermeáveis, os resultados de caudal médio galgado obtidos com o modelo AMAZON foram comparados com os resultados de ensaios em modelo físico bidimensional realizados anteriormente e disponíveis na base de dados do projeto europeu CLASH. Os resultados foram ainda comparados com os das fórmulas empíricas e semi-empíricas de Van der Meer & Bruce de 2014, de Goda de 2008 e de Hedges & Reis de 2015.

Antes da sua validação, o modelo foi calibrado utilizando um dos ensaios do CLASH. Para tal, realizou-se uma análise de sensibilidade a alguns parâmetros do modelo, concretamente da dimensão mínima da malha, da escala de aplicação do AMAZON (à escala reduzida ou à do protótipo), da forma de modelação da parede vertical, já que, dado este modelo ser integrado na vertical, não é possível considerar paredes verticais sem utilizar um artifício de cálculo, dos valores de alguns dos parâmetros de entrada do modelo (profundidade mínima molhada e a profundidade mínima de fricção) e da dimensão do domínio de cálculo.

Os resultados da calibração do AMAZON mostram que, por causa da precisão do modelo para os menores caudais médios de galgamento, se deve aplicar o modelo à escala do protótipo. Para estruturas verticais, a aproximação que o modelo faz, por defeito, para a secção vertical da estrutura através de um talude fictício a 10:1 apresenta melhores resultados que a utilização de um talude a 20:1. Contudo, ambos requerem a adoção de uma dimensão da malha bastante reduzida nesta zona e na sua vizinhança (0.03 m). No caso em estudo, os dois parâmetros de entrada do modelo não têm impacto significativo nos resultados, ao contrário do domínio de cálculo que, tal como recomendado na literatura de referência, se deve iniciar (fronteira de entrada) a aproximadamente um comprimento de onda do pé da estrutura.

Os resultados obtidos mostram que, em geral, o AMAZON subestima o valor medido do caudal médio galgado com erros relativos variáveis entre -91% e -49%; apenas para um caso o modelo sobrestima o caudal médio, com um erro relativo de 43%. Quando comparado com as formulações empíricas e semi-empíricas, a fórmula de Van der Meer & Bruce apresenta melhores aproximações aos caudais médios medidos que constam na base de dados do CLASH, seguida da fórmula de Goda e dos resultados do modelo AMAZON, embora estes dois últimos apresentem valores bastante próximos. Assim, uma vez que o modelo está em constante desenvolvimento, espera-se que no futuro seja uma ferramenta mais poderosa. Contudo, enquanto não se fizerem melhorias no modelo e/ou não se estender a outros ensaios a análise feita no âmbito desta dissertação, os resultados sugerem que não há vantagem na sua utilização face às formulações empíricas e semi-empíricas disponíveis, tendo também em conta o significativo tempo computacional exigido para executar o AMAZON com a dimensão da malha escolhida.

**Palavras-chave:** Galgamento, Estruturas marítimas verticais, AMAZON, CLASH, Fórmulas empíricas e semi-empíricas.



## Abstract

The wave overtopping is a phenomenon associated with wave interaction with maritime structures. In this dissertation the overtopping of vertical maritime structures is studied by applying the numerical model AMAZON. This model is a two-dimensional model based on the non-linear shallow water equations.

To validate the model application to impermeable vertical maritime structures, the mean overtopping discharges obtained by AMAZON were compared with two-dimensional physical model tests performed previously and available at the database of the CLASH European project. The AMAZON results were also compared with the results of the empirical and semi-empirical formulas of Van der Meer & Bruce (of 2014), Goda (of 2008) and Hedges & Reis (of 2015).

Prior to its validation, the model was calibrated using one of the tests at the CLASH database. A sensitivity analysis to some model parameters was done, specifically: the minimum size of the mesh; the scale of application of AMAZON (reduced or prototype scale); the values of some input parameters (minimum wet depth and minimum friction depth); the size of the numerical domain; and the approximation used to model vertical walls, since AMAZON is a depth integrated model and cannot strictly consider vertical structures.

The AMAZON calibration results show that, because of the required model's accuracy for small mean overtopping discharges, the model should be applied at prototype scale. For vertical structures, the approach used by default by AMAZON, which is to approximate the vertical face by a dummy slope 10:1, provides better results than using a slope of 20:1. However, both approximations require the adoption of a reduced mesh size in this area and its vicinity (0:03 m). In this particular case, the two model input parameters have no significant impact on the results, unlike the calculation domain, which should start (input boundary) at approximately one wavelength from the structure toe, as recommended in the relevant literature.

The results showed that, in general, AMAZON underestimated the value of the measured mean overtopping discharges of the CLASH database, with relative errors varying between -91% and -49%; only for one test, the model overestimates the mean discharge, with a relative error of 43%. When comparing AMAZON with the formulas, it was concluded that the Van der Meer & Bruce formula gives the best approximations to the CLASH values, followed by the Goda formula and the AMAZON numerical model, although the two last produce fairly close results.

Since the model is under constant development, it is expected that in the future it will be a more powerful tool. However, while improvements are not made in the model and/or the analysis performed in the scope of this dissertation is not extended to other tests, the results suggest that there is no clear advantage in using AMAZON instead of the empirical/semi-empirical formulations available, also taking into account the significant computational time required to perform the AMAZON runs with the selected mesh size.

**Keywords:** Wave overtopping, Vertical maritime structures, AMAZON, CLASH, Empirical and semi-empirical formulas



# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	3
2. Galgamento .....	5
2.1. Definição do galgamento.....	5
2.2. Algumas das características das ondas .....	5
2.3. Rebentação .....	7
3. Base de Dados CLASH .....	9
3.1. Introdução.....	9
3.2. Parâmetros hidráulicos e estruturais.....	9
4. Modelo Numérico AMAZON .....	13
4.1. Descrição.....	13
4.2. Seleção dos ensaios do CLASH a reproduzir com o modelo .....	17
5. Fórmulas Empíricas e Semi-Empíricas para Estruturas Verticais Simples.....	19
5.1. Descrição das fórmulas .....	19
5.2. Aplicação das fórmulas aos dados do CLASH .....	21
6. Aplicação do modelo AMAZON aos dados do CLASH .....	27
6.1. Descrição de alguns parâmetros de entrada do modelo .....	27
6.2. Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo .....	27
6.3. Comparação de resultados do AMAZON com os das fórmulas e do CLASH .....	34
7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros.....	39
8. Bibliografia .....	41



## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Galgamento (adaptado de Verhaeghe, 2005). .....	5
Figura 2.2 – Algumas características das ondas (adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).....	6
Figura 2.3 – Ângulo de incidência da onda (adaptado de <a href="http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx">http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx</a> ). .....	7
Figura 2.4 – Tipos de rebentação (adaptado de USACE, 2006). .....	8
Figura 3.1– Representação de alguns dos parâmetros da base de dados CLASH (adaptado de <a href="http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx">http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx</a> ). .....	11
Figura 4.1 – Exemplo de configurações de estruturas possíveis de modelar com o AMAZON.....	15
Figura 4.2 – Exemplos de introdução de dados no modelo AMAZON: a) interface de definição do perfil do “foreshore” e da estrutura à escala de protótipo; b) ficheiro de definição do número de sondas colocadas no modelo e sua localização ao longo do domínio. ....	15
Figura 4.3 – Interface de definição dos dados de entrada do modelo AMAZON. ....	16
Figura 4.4 – Exemplos de saída de resultados numéricos e gráficos no modelo AMAZON.....	17
Figura 5.1 – Relação entre $q$ e $q_{CLASH}$ (escala de modelo). .....	22
Figura 5.2 – Relação entre $q$ e $q_{CLASH}$ para $q < 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}$ (escala de modelo). ....	22
Figura 5.3 – Erro relativo das fórmulas. ....	23
Figura 5.4 – Erro relativo absoluto das fórmulas. ....	24
Figura 5.5 – Erro absoluto das fórmulas (escala de modelo). ....	24
Figura 6.1 – Exemplo da secção transversal de um dos casos de estruturas verticais simples da base de dados CLASH a estudar com o modelo AMAZON (escala de modelo).....	28
Figura 6.2 – Exemplo dos perfis do “foreshore” e da estrutura e da localização das sondas no modelo AMAZON, para o ensaio 502-034, à escala de modelo, com malha=0.001 m na zona de interesse para o cálculo do caudal médio galgado. ....	29
Figura 6.3 – Domínio de cálculo a considerar no modelo AMAZON.....	32
Figura 6.4 – Relação entre $q$ e $q_{CLASH}$ (valores à escala de protótipo). ....	34
Figura 6.5 – Relação entre $q$ e $q_{CLASH}$ para $q < 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$ (valores à escala de protótipo). ....	35
Figura 6.6 – Erro relativo. ....	36
Figura 6.7 – Erro relativo absoluto. ....	36

Figura 6.8 – Erro absoluto (valores à escala de protótipo). ..... 37

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Profundidades. ....	6
Quadro 3.1 – Parâmetro $\gamma_f$ (adaptado de Steendam <i>et al.</i> , 2004). ....	11
Quadro 3.2 – Parâmetro CF (adaptado de Steendam <i>et al.</i> , 2004). ....	11
Quadro 3.3 – Parâmetro RF da base de dados CLASH (adaptado de Steendam <i>et al.</i> , 2004). ....	12
Quadro 4.1 – Características dos 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH. ....	18
Quadro 5.1– Condições de aplicabilidade das fórmulas de Hedges & Reis (Reis <i>et al.</i> , 2013; Silva, 2015). ....	21
Quadro 5.2 – Intervalo de valores para as condições de rebentação e empolamento para os 6 ensaios 502. ....	25
Quadro 6.1 – Influência da dimensão mínima da malha no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de modelo para o ensaio 502-034. ....	29
Quadro 6.2 – Relação de escalas com base na semelhança de Froude (adaptado de Kortenhaus <i>et al.</i> , 2005). ....	30
Quadro 6.3 – Influência da dimensão mínima da malha no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de modelo e de protótipo para o ensaio 502-034. ....	30
Quadro 6.4 – Influência do talude de aproximação da estrutura vertical no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de protótipo para o ensaio 502-034. ....	30
Quadro 6.5 – Influência da localização da fronteira de entrada no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de protótipo, para o ensaio 502-034. ....	32
Quadro 6.6 – Valores de q calculados pelo modelo AMAZON à escala de protótipo para os 6 ensaios considerados, com a fronteira de entrada a $L_0$ do pé da estrutura vertical. ....	33
Quadro 6.7 – Condições de agitação no pé da estrutura vertical nos 6 ensaios 502 considerados (valores à escala de protótipo). ....	33



## Listas de Símbolos

A	Coeficiente empírico	[-]
$A_c$	Altura da berma permeável de coroamento da estrutura acima do nível de repouso	[m]
$A_c$	Amplitude da crista	[m]
$A_s$	Amplitude da cava	[m]
$A_0$	Coeficiente empírico	[-]
B	Largura da berma da estrutura	[m]
B	Coeficiente empírico	[-]
$B_h$	Largura da berma horizontalmente esquematizada	[m]
$B_t$	Largura da banquetta do pé do talude da estrutura	[m]
$B_0$	Coeficiente empírico	[-]
$\cot\alpha_d$	Cotangente do ângulo entre o talude da estrutura e a horizontal, medido abaixo da berma da estrutura	[-]
$\cot\alpha_{excl}$	Cotangente do ângulo médio entre o talude da estrutura e a horizontal, excluindo a berma	[-]
$\cot\alpha_{incl}$	Cotangente do ângulo médio entre o talude da estrutura e a horizontal, incluindo a berma	[-]
$\cot\alpha_u$	Cotangente do ângulo entre o talude da estrutura e a horizontal, medido acima da berma da estrutura	[-]
C	Celeridade da onda	[m/s]
CF	Fator de complexidade da estrutura testada num ensaio da base de dados CLASH	[-]
d	Profundidade no domínio de cálculo do modelo AMAZON	[m]
g	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_c$	Largura da berma de coroamento da estrutura	[m]
h	Profundidade em frente à estrutura	[m]
$h_b$	Profundidade acima da berma da estrutura	[m]
$h_{deep}$	Profundidade junto ao gerador	[m]
$h_{pp}$	Valor de $L_0/20$ , em pequenas profundidades	[m]
$h_t$	Profundidade na banquetta do pé do talude da estrutura	[m]
H	Altura de onda	[m]
$H_{m0\ deep}$	Altura significativa de onda obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador)	[m]
$H_{m0\ toe}$	Altura significativa de onda obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro em frente à estrutura	[m]
$H_s$	Altura de onda significativa (média do terço mais alto das alturas de onda num registo)	[m]
L	Comprimento de onda	[m]
$L_0$	Comprimento de onda ao largo	[m]

$L_{m-1,0}$	Comprimento de onda em grandes profundidades baseado no período médio das ondas $T_{m-1,0 \text{ toe}}$	[m]
$L_{op \text{ depp}}$	Comprimento de onda em grandes profundidades baseado no período de pico $T_{p \text{ depp}}$	[m]
$m$	Medida da inclinação do talude em frente à estrutura – “foreshore” (1:m, inclinação de 1 na vertical para m na horizontal)	[-]
$m_{-1}$	Momento de ordem -1 do espectro	
$m_0$	Momento de ordem 0 do espectro	
$m_2$	Momento de ordem 2 do espectro	
$N_L$	Escala geométrica do modelo físico reduzido	[-]
$P1$	Ponto onde se pretende estimar o caudal médio de galgamento através do AMAZON	[-]
$P_{ow}$	Porcentagem de ondas que resultam em galgamento	[%]
$q$	Caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura	[m <sup>3</sup> /s/m]
$q_{AMAZON}$	Caudal médio de galgamento determinado pelo AMAZON	[m <sup>3</sup> /s/m]
$q_{CLASH}$	Caudal médio de galgamento da base de dados CLASH	[m <sup>3</sup> /s/m]
$R_c$	Bordo livre da estrutura	[m]
$RF$	Fator de fiabilidade de um ensaio contido na base de dados CLASH	[-]
$R_{max}$	Espraiamento máximo.	[m]
$(R_{max})_{37\%100}$	Valor máximo do espraiamento não excedido em 37% dos casos para registos de 100 ondas	[m]
$(R_{max})_{99\%100}$	Valor máximo do espraiamento não excedido em 99% dos casos para registos de 100 ondas	[m]
$s_{m-1,0}$	Declividade da onda calculada com $L_{m-1,0}$	[-]
$\tan\alpha_B$	Tangente do ângulo entre a berma da estrutura e a horizontal	[-]
$T$	Período da onda	[s]
$T_{m \text{ depp}}$	Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem 0 e 2 ( $m_0$ e $m_2$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador) ou por análise no domínio do tempo	[s]
$T_{m \text{ toe}}$	Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem 0 e 2 ( $m_0$ e $m_2$ ) do espectro (em frente à estrutura) ou por análise no domínio do tempo	[s]
$T_{m-1,0 \text{ depp}}$	Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem -1 e 0 ( $m_{-1}$ e $m_0$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador)	[s]
$T_{m-1,0 \text{ toe}}$	Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem -1 e 0 ( $m_{-1}$ e $m_0$ ) do espectro em frente à estrutura	[s]

$T_p$	Período de pico do espectro das ondas incidentes	[s]
$T_{p \text{ deep}}$	Período de pico do espectro em águas profundas (junto ao gerador)	[s]
$T_{p \text{ toe}}$	Período de pico do espectro em frente à estrutura	[s]

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo do talude da praia ou da estrutura com a horizontal	[°]
$\beta$	Ângulo de incidência da onda relativamente à normal à estrutura	[°]
$\gamma_f$	Fator de rugosidade/permeabilidade da estrutura	[-]
$\varepsilon$	Declividade da onda	[-]
$\theta$	Ângulo do talude em frente à estrutura – “foreshore”	[°]
$\xi$	Número de Iribarren	[-]
$\pi$	Constante de Arquimedes	[-]



## Lista de Siglas e Acrónimos

CLASH	Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
H&R	Hedges & Reis
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NLSW	Non-Linear Shallow Water
NR	Nível da água em repouso
UNL	Universidade Nova de Lisboa
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
V&B	Van der Meer & Bruce



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Nos dias de hoje, assiste-se a uma maior ocupação das zonas costeiras por parte daqueles que escolhem essas zonas para nela desenvolverem as suas atividades de lazer e comércio. Desta forma, é cada vez mais preocupante a segurança de pessoas e bens em áreas costeiras com problemas de erosão e inundação, aumentando a aplicação do conceito de risco nestas zonas.

Neste contexto, surge a necessidade de garantir alguma segurança na costa, o que se faz muitas vezes através da construção de estruturas, como é o caso das estruturas de proteção costeira (esporões, estruturas de proteção marginal, etc.) que visam mitigar o avanço do mar em direção a terra. As estruturas de proteção marginal são estruturas verticais ou em talude dimensionadas para manter estável a linha de costa e reduzir o galgamento nas zonas por elas protegidas.

O galgamento é, assim, o efeito que ocorre quando, pela ação das ondas do mar, a água passa sobre a cota de coroamento da estrutura, podendo atingir proporções de tal maneira preocupantes que podem levar a que pessoas e veículos sejam arrastados, edifícios e estradas sejam danificados, ou até a que a própria estrutura de proteção possa ser danificada.

É então importante, no dimensionamento de estruturas de proteção marginal, verificar que a estrutura cumpre os requisitos estruturais e funcionais no que diz respeito ao galgamento, isto é, que o galgamento não ultrapassa os limites que permitem garantir a integridade da estrutura e a segurança de pessoas e infraestruturas por ela protegidas. Daí a importância de quantificar o galgamento, o que é feito normalmente utilizando métodos empíricos ou semi-empíricos (fórmulas e redes neuronais), modelos físicos ou numéricos.

As ferramentas empíricas ou semi-empíricas, que se baseiam em dados de ensaios em modelo físico e em alguns dados de campo, embora sejam as mais utilizadas em projeto para o cálculo do galgamento e as mais fáceis de utilizar, aplicam-se aos casos particulares e simples que foram contemplados nos ensaios de laboratório. Na natureza, os casos a estudar são muitas vezes mais complexos.

Os modelos físicos, apesar de ainda serem nesta altura os mais fiáveis, acabam muitas vezes por ser dispendiosos, difíceis de realizar e explorar devido às suas dimensões, implicam conhecimento muito especializado por parte do utilizador e são demorados no estudo do galgamento.

Com os constantes desenvolvimentos computacionais, os modelos de cálculos numéricos estão cada vez mais poderosos e muito aliciantes na avaliação do galgamento. Estes modelos, quando válidos, podem ser adaptados a cada caso de estudo em particular, sendo no entanto o tempo de cálculo muitas vezes elevado. Ainda assim, acabam por ser uma alternativa, permitindo alcançar resultados com baixo custo (Reis & Neves, 2010). Um dos modelos numéricos utilizados a nível de projeto para o cálculo do galgamento de estruturas em talude é

o modelo AMAZON (Hu, 2000; Neves *et al.*, 2008, 2010; Reis *et al.*, 2008b, 2009a,b, 2011; Reis & Neves, 2010; Mariz., 2012). Este modelo alia um bom compromisso entre tempo de cálculo e precisão e permite calcular o galgamento para uma maior gama de geometrias da estrutura e condições de agitação que as fórmulas, válidas apenas para as condições para as quais foram desenvolvidas.

## 1.2. Objetivo

Com este trabalho, pretende-se estudar a aplicabilidade do modelo numérico AMAZON ao cálculo do galgamento em estruturas marítimas verticais.

O modelo AMAZON é um modelo numérico bidimensional baseado na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas. Originalmente o modelo foi concebido essencialmente para estruturas impermeáveis e desde então tem estado em constante desenvolvimento.

Os resultados do modelo numérico AMAZON, obtidos no âmbito da presente dissertação, são influenciados pela batimetria, características da estrutura, condições da agitação marítima, nível da água e parâmetros do modelo, os quais foram alvo de calibração, sendo, para tal, os resultados do modelo comparados com dados experimentais.

Sendo assim, a aplicação do modelo AMAZON é feita para casos de estruturas marítimas verticais impermeáveis para as quais existem resultados de ensaios em modelo físico bidimensional, realizados anteriormente e disponíveis na base de dados do projeto europeu CLASH - *Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neutral network prediction and Hazard analysis on permissible wave over-topping* (Verhaeghe, 2005; Van der Meer *et al.*, 2009).

Os resultados do modelo são comparados com os obtidos pelos ensaios, o que permite a sua calibração e também analisar a aplicabilidade e a bondade dos seus resultados. São ainda comparados com os resultados das fórmulas empíricas e/ou semi-empíricas mais usadas em projeto, de forma a verificar as principais vantagens e limitações da aplicação deste modelo a este tipo de estruturas.

## 1.3. Metodologia

No sentido de atingir os objetivos definidos anteriormente, o presente trabalho consistiu em:

- Estudo do fenómeno do galgamento em estruturas verticais;
- Estudo e aplicação do modelo AMAZON a um grupo selecionado de casos de estruturas verticais, condições de agitação marítima e nível de água em repouso, para os quais existem dados de ensaios disponíveis na base de dados do CLASH;
- Validação do modelo AMAZON por comparação dos resultados de modelação numérica com os resultados de ensaios em modelo físico;
- Comparação dos resultados do modelo AMAZON com os resultados das fórmulas empíricas e/ou semi-empíricas normalmente utilizadas em projeto deste tipo de obras marítimas.

## **1.4. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é composta por 7 capítulos, aos quais se adiciona a bibliografia.

Neste capítulo, capítulo 1, apresenta-se uma breve introdução ao estudo, com o enquadramento do tema, objetivo e metodologia do trabalho desenvolvido. No capítulo 2 descreve-se brevemente o fenómeno do galgamento e algumas características das ondas. No capítulo 3 apresenta-se a base de dados CLASH e os seus parâmetros. No capítulo 4 descreve-se o modelo AMAZON e os ensaios aos quais o modelo foi aplicado no âmbito deste estudo. No capítulo 5 abordam-se as fórmulas empíricas e semi-empíricas e seus resultados. No capítulo 6 apresentam-se e analisam-se os resultados do modelo AMAZON. Por fim, no Capítulo 7 é feita uma síntese sobre os resultados e apresentam-se conclusões e possíveis trabalhos futuros.



## 2. Galgamento

### 2.1. Definição do galgamento

Como definido anteriormente, o galgamento ocorre quando, por ação das ondas, a água consegue passar a cota de coroamento da estrutura de proteção marítima. O caudal médio de galgamento,  $q$ , é assim, o volume de água que passa sobre o coroamento da estrutura, por metro linear de estrutura e no tempo (Figura 2.1).

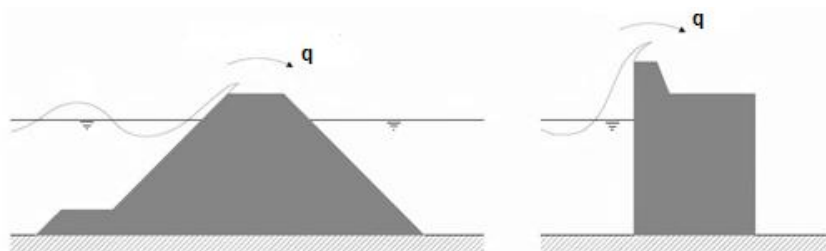


Figura 2.1 – Galgamento (adaptado de Verhaeghe, 2005).

Como tal, o valor máximo de galgamento admitido por questões de segurança estrutural e funcional condiciona a cota de coroamento da estrutura, bem como a forma da superestrutura, logo o custo, a eficiência e o impacto visual da obra também são condicionados pelo galgamento.

Utilizando métodos de cálculo tais como as fórmulas empíricas ou semi-empíricas, modelos físicos e numéricos, pode-se estimar o volume de galgamento de um certo número de ondas por unidade de tempo e por metro linear do coroamento da estrutura.

Um dos fatores que influencia o galgamento, além da agitação marítima e da geometria da estrutura, é a profundidade junto à obra, que varia consoante o nível de maré. As marés são fenómenos provocados pela ação do campo gravítico da lua e do sol sobre as massas de água da terra. A preia-mar de águas vivas, que corresponde ao nível máximo de maré, juntamente com a ação do vento e em condições de tempestade, pode agravar ainda mais o galgamento.

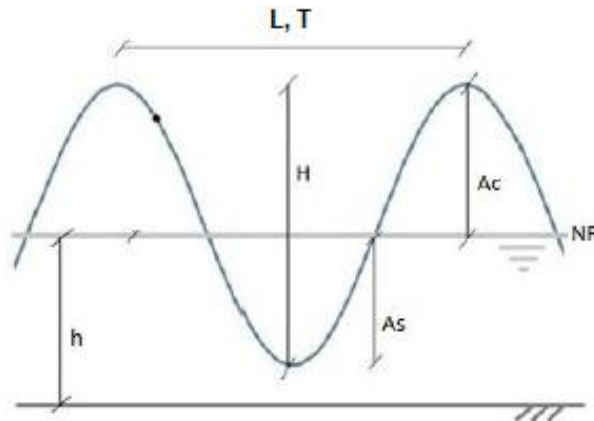
### 2.2. Algumas das características das ondas

Uma onda sinusoidal equivale a uma oscilação uniforme e periódica da superfície da água (Figura 2.2).

Para caracterizar uma onda, é importante definir os seguintes parâmetros:

- Período da onda ( $T$ ): corresponde ao tempo que decorre entre a passagem de dois pontos idênticos sucessivos da superfície livre;
- Comprimento de onda ( $L$ ): distância horizontal entre dois pontos idênticos sucessivos da superfície livre;
- Altura de onda ( $H$ ): distância vertical entre a crista e a cava da onda;
- Nível médio da água ( $NR$ ): nível da água em repouso;
- Amplitude da crista ( $Ac$ ): distância vertical máxima entre o  $NR$  e a crista;
- Amplitude da cava ( $As$ ): distância vertical máxima entre o  $NR$  e a cava;

- Profundidade (h): coluna de água medida entre o NR e o fundo.



**Figura 2.2 – Algumas características das ondas (adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).**

A velocidade com que cada uma das ondas se propaga é denominada celeridade (C) das ondas e calcula-se através da equação:

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Para pequenas profundidades ( $h < L/20$ ) C diminui progressivamente com a diminuição de h (Quadro 2.1). Em grandes profundidades ( $h > L/2$ ), a celeridade só depende do comprimento de onda, não variando em profundidade. Para profundidades intermédias ( $L/20 < h < L/2$ ), a celeridade varia quer com a profundidade, quer com o comprimento de onda.

**Quadro 2.1 – Profundidades.**

Profundidades	h [m]	C [m/s]
Pequenas	$h < \frac{L}{20}$	$\sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
Intermédias	$\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$	$\sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$
Grandes	$h < \frac{L}{2}$	$\sqrt{gh}$

Nota:  $g=9.81 \text{ m/s}^2$  – aceleração da gravidade;  $\pi$  - constante de Arquimedes.

Para caraterizar uma onda recorre-se também muitas vezes à declividade ( $\epsilon$ ) da onda:

$$\epsilon = \frac{H}{L} \quad (2.2)$$

que ajuda a descrever a forma da onda num determinado local.

O ângulo de incidência das ondas, ( $\beta$ ), é outro parâmetro importante e corresponde ao ângulo formado entre a direção de propagação das ondas e a direção perpendicular à praia ou estrutura (Figura 2.4). Um valor de  $\beta = 0$  significa que a onda é perpendicular à estrutura.

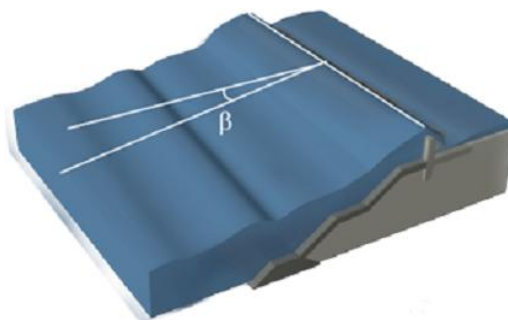


Figura 2.3 – Ângulo de incidência da onda (adaptado de <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>).

### 2.3. Rebentação

Na propagação da onda, a rebentação surge junto à costa devido à diminuição de profundidade e consequente redução da celeridade, ou ainda por excesso de declividade da onda. Existem diversos tipos de rebentação (Dean e Dalrymple, 1991):

- Rebentação progressiva (*spilling*);
- Rebentação mergulhante (*plunging*);
- Rebentação de fundo (*surging*);
- Rebentação colapsante (*collapsing*).

Dependendo da inclinação do talude ( $\alpha$ ) da praia ou da estrutura com a horizontal e também da declividade da onda, o tipo de rebentação pode ser estabelecido em função do número de Iribarren ( $\xi$ ) (Figura 2.3), determinado por:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (2.3)$$

Na rebentação do tipo progressiva a crista deforma-se e destabiliza-se, criando uma leve espuma sobre o talude. Normalmente acontece em taludes de declive suave. Por sua vez, a rebentação mergulhante ocorre de forma súbita, onde a crista da onda cria uma curvatura e cai sobre o talude, originando grandes salpicos. Normalmente sucede em taludes de declive intermédio. Na rebentação colapsante a crista não rebenta completamente, não ocorrem grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude. Já na rebentação de fundo a onda não chega a rebentar propriamente, mas espalha-se sobre o talude. Normalmente ocorre em taludes de declive muito acentuado.

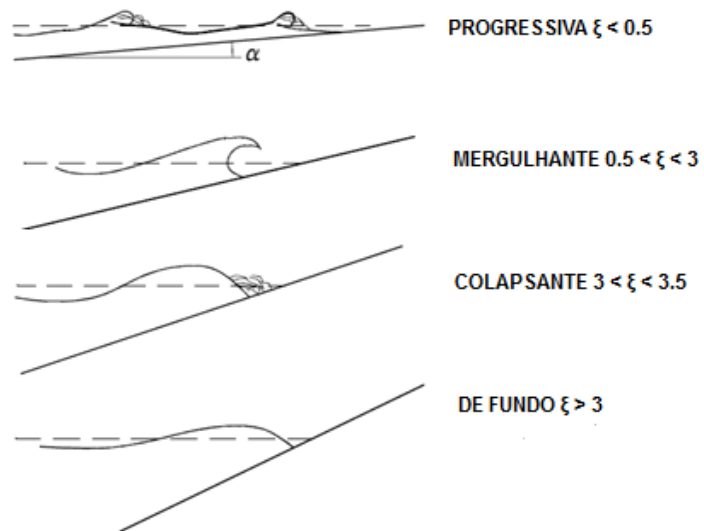


Figura 2.4 – Tipos de rebentação (adaptado de USACE, 2006).

## 3. Base de Dados CLASH

### 3.1. Introdução

No sentido de se obter um maior conhecimento sobre o fenómeno do galgamento, ou seja, armazenar numa base de dados os caudais médios galgados, que posteriormente são estudados e, se válidos, utilizados para o dimensionamento de estruturas marítimas, desenvolveu-se, no âmbito do projeto europeu CLASH, a base de dados CLASH que é constituída por 10532 ensaios executados na Europa, Estados Unidos e Japão. A cada ensaio estão associados 31 parâmetros (Steendam *et al.*, 2004): o nome, 28 parâmetros hidráulicos (que descrevem a ação da onda para um determinado nível de água) e estruturais (parâmetros característicos da geometria/composição da própria estrutura) e dois fatores caracterizadores da complexidade da estrutura galgada e da fiabilidade do ensaio.

Alguns ensaios contidos nesta base de dados foram utilizados nesta dissertação para calibrar e validar os resultados do modelo numérico AMAZON.

### 3.2. Parâmetros hidráulicos e estruturais

A seguir descrevem-se os 31 parâmetros contidos na base de dados CLASH para cada ensaio, apresentando-se os mesmos por ordem alfabética dos seus símbolos. Na Figura 3.1 encontram-se representados alguns desses parâmetros.

#### 1 Nome:

- A cada teste é atribuído um nome.

#### 11 Parâmetros hidráulicos:

- Altura significativa de onda obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador) ( $H_{m_0 \text{ deep}}$ ) [m];
- Altura significativa de onda obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro em frente à estrutura ( $H_{m_0 \text{ toe}}$ ) [m];
- Percentagem de ondas que resultam em galgamento ( $P_{ow}$ ) [%];
- Caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura ( $q$ ) [ $m^3/s/m$ ];
- Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem 0 e 2 ( $m_0$  e  $m_2$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador) ou por análise no domínio do tempo ( $T_{m \text{ deep}}$ ) [s];
- Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem 0 e 2 ( $m_0$  e  $m_2$ ) do espectro em frente à estrutura ou por análise no domínio do tempo ( $T_{m \text{ toe}}$ ) [s];
- Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem -1 e 0 ( $m_{-1}$  e  $m_0$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador) ( $T_{m_{-1,0} \text{ deep}}$ ) [s];
- Período médio das ondas obtido com os momentos de ordem -1 e 0 ( $m_{-1}$  e  $m_0$ ) do espectro em frente à estrutura ( $T_{m_{-1,0} \text{ toe}}$ ) [s];
- Período de pico do espectro em águas profundas (junto ao gerador) ( $T_{p \text{ deep}}$ ) [s];

- Período de pico do espectro em frente à estrutura ( $T_{p\ toe}$ ) [s];
- Ângulo de incidência da onda ( $\beta$ ) relativamente à normal à estrutura [°].

#### 17 Parâmetros estruturais:

- Altura da berma permeável de coroamento da estrutura acima do nível de repouso ( $A_c$ ) [m];
- Largura da berma da estrutura (B) [m];
- Largura da berma horizontalmente esquematizada ( $B_h$ ) [m];
- Largura da banqueteta do pé do talude da estrutura ( $B_t$ ) [m];
- Cotangente do ângulo entre o talude da estrutura e a horizontal, medido abaixo da berma da estrutura ( $cot\alpha_d$ ) [-];
- Cotangente do ângulo médio entre o talude da estrutura e a horizontal, excluindo a berma ( $cot\alpha_{excl}$ ) [-];
- Cotangente do ângulo médio entre o talude da estrutura e a horizontal, incluindo a berma ( $cot\alpha_{incl}$ ) [-];
- Cotangente do ângulo entre o talude da estrutura e a horizontal, medido acima da berma da estrutura ( $cot\alpha_u$ ) [-];
- Largura da berma de coroamento da estrutura ( $G_c$ ) [m];
- Profundidade acima da berma da estrutura ( $h_b$ ) [m];
- Profundidade em frente à estrutura (h) [m];
- Profundidade junto ao gerador ( $h_{deep}$ ) [m];
- Profundidade na banqueteta do pé do talude da estrutura ( $h_t$ ) [m];
- Medida da inclinação do talude em frente à estrutura – “foreshore” (1:m, inclinação de 1 na vertical para m na horizontal) ( $\theta$ ) [-];
- Bordo livre da estrutura ( $R_c$ ) [m];
- Tangente do ângulo entre a berma da estrutura e a horizontal ( $\tan\alpha_B$ ) [-];
- Fator de rugosidade/permeabilidade da estrutura ( $\gamma_f$ ) [-].

#### 2 Fatores:

- Fator de complexidade da estrutura testada num ensaio da base de dados CLASH (CF) [-];
- Fator de fiabilidade de um ensaio contido na base de dados CLASH (RF) [-].

No Quadro 3.1 indicam-se os valores de  $\gamma_f$  em função, essencialmente, do tipo de material que constitui a estrutura. Para alguns casos, os valores de  $\gamma_f$  são também apresentados em função do modo de colocação dos blocos constituintes e da permeabilidade do núcleo da estrutura.

Os parâmetros CF e RF encontram-se classificados através de níveis nos Quadros 3.2 e 3.3, respetivamente.

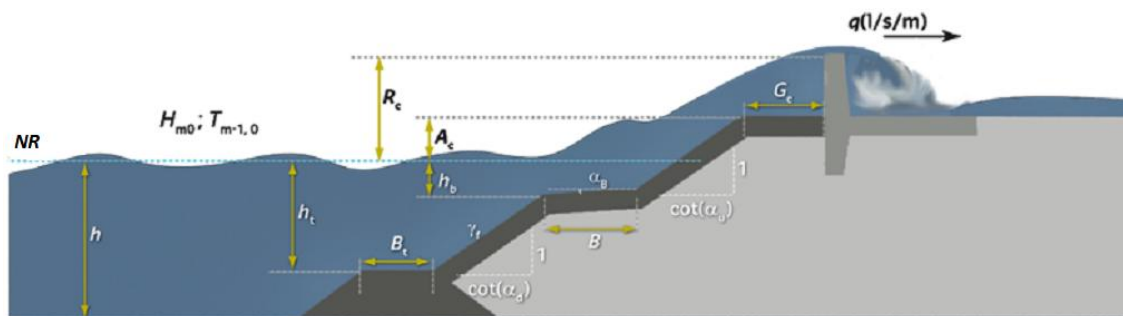


Figura 3.1– Representação de alguns dos parâmetros da base de dados CLASH (adaptado de <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>).

Quadro 3.1 – Parâmetro  $\gamma_f$  (adaptado de Steendam *et al.*, 2004).

Tipo de material	$\gamma_f$
Superfície lisa e impermeável	1.00
Enrocamento (1 camada, núcleo impermeável)	0.60
Enrocamento (2 camadas, núcleo impermeável)	0.55
Cubos (1 camada, dispostos aleatoriamente)	0.52
Cubos (2 camadas, dispostos aleatoriamente), Enrocamento, Cubos Antifer, Seabeas	0.50
Acropodes <sup>TM</sup> , Xblock <sup>®</sup>	0.49
CORE-LOC <sup>®</sup> , HARO's	0.47
Enrocamento (1 camada, núcleo permeável)	0.45
<i>Dolos</i>	0.43
Enrocamento (2 camadas, núcleo permeável), Tetrápodos	0.40

Quadro 3.2 – Parâmetro CF (adaptado de Steendam *et al.*, 2004).

Nível 1	Estrutura de geometria simples
Nível 2	Estrutura de geometria consideravelmente simples
Nível 3	Estrutura de geometria consideravelmente complexa
Nível 4	Estrutura de geometria muito complexa

**Quadro 3.3 – Parâmetro RF da base de dados CLASH (adaptado de Steendam *et al.*, 2004).**

Nível 1	Representação muito fiável
Nível 2	Representação fiável
Nível 3	Representação menos fiável
Nível 4	Representação pouco fiável

## 4. Modelo Numérico AMAZON

### 4.1. Descrição

O modelo AMAZON (Hu, 2000) aplicado nesta tese, desenvolvido originalmente em Manchester Metropolitan University, é um modelo numericamente muito estável e robusto que se baseia na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW - *Non-Linear Shallow Water*) mediante a simplificação das equações de Reynolds por integração na profundidade, admitindo que o fluido (água) é incompressível, isotrópico e Newtoniano. Assume-se que a pressão é hidrostática e despreza-se a aceleração vertical do escoamento, dado ser bastante menor do que a aceleração horizontal em pequenas profundidades.

As equações são resolvidas por um método de volumes finitos de segunda ordem no tempo e no espaço. O modelo utiliza o esquema numérico MUSCL-Hancock (Van Leer, 1979; Van Albada *et al.*, 1982) que é um método de Godunov que usa uma reconstrução monotónica das variáveis para obter valores na interface das células, de modo a prevenir oscilações espúrias da solução. Na fase de correção, as soluções dos problemas locais de Riemann são calculadas usando a aproximação de HLL (Harten, Lax e Van Leer), que permite descrever a rebentação e simular escoamentos de regime rápido (Harten *et al.*, 1983). O modelo incorpora um modelo de turbulência simples de zero equação.

Utilizando o método de volumes finitos, o AMAZON permite gerar malhas constituídas por elementos que podem ter qualquer forma (e.g. retangular, triangular e hexagonal) e dimensões variáveis, possibilitando com isto, criar uma malha fina em zonas de interesse de um estudo mais detalhado e malhas grosseiras onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

O modelo permite simular tanto ondas regulares como ondas irregulares, e a rebentação é simulada com o conceito de macaréu (*tidal bore*) (Hu, 2000).

O modelo AMAZON incorpora, na sua fronteira de entrada, um método numérico de absorção de ondas que permite absorver mais de 98% das ondas refletidas pela estrutura. Este facto permite colocar a fronteira de entrada junto da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, já que se baseia na resolução das equações NLSW (Reis & Neves, 2010).

Para que o modelo devolva resultados otimizados, segundo Hu & Meyer (2005), a fronteira de entrada deverá ser colocada a, aproximadamente, um comprimento de onda do pé da estrutura,  $L_0$ , calculado por:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (4.1)$$

onde:

- $L_0$  é o comprimento de onda ao largo;
- $T_p$  é o período de pico do espetro incidente.

Uma vez que o modelo se baseia nas equações NLSW, deve-se ainda verificar que as condições a que se estão a aplicar o AMAZON são de águas pouco profundas:  $d < L_0/20 = h_{pp}$ ,

em que  $d$  é a profundidade no domínio de cálculo e  $h_{pp}$  é o valor de  $L_0/20$ , em pequenas profundidades. Outra condição de aplicação do modelo é garantir que  $d/L_0$  está no intervalo 0.016 e 0.19 (Pullen & Allsop, 2003), sendo neste caso  $d$  a profundidade na fronteira de entrada do modelo.

A grande vantagem de modelos deste tipo no cálculo do galgamento é que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas, tornando a sua aplicação viável, quer em dimensionamento de estruturas galgáveis, quer em estudos de previsão de inundação.

O modelo já foi usado e 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), pois apenas permitia a consideração do efeito da porosidade através do recurso a uma dissipação artificial de energia, recorrendo a um parâmetro de atrito de fundo (coeficiente de Chézy) (Hu, 2000). Desde 2007, o modelo tem vindo a ser desenvolvido para estruturas porosas pelo LNEC em colaboração com a Royal HaskoningDHV do Reino Unido, onde trabalha o autor do modelo, tendo sido também objeto de validação (Reis & Neves, 2010; Reis *et al.*, 2008a,b, 2009a,b, 2011; Mariz, 2012). Foi ainda recentemente analisada a sua aplicabilidade a uma estrutura conversora de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, para a qual o modelo AMAZON nunca tinha sido utilizado (Mestre, 2015; Reis *et al.*, 2015).

Contudo, apesar do modelo permitir considerar estruturas com várias configurações (Figura 4.1), por ser um modelo integrado na profundidade não permite modelar a parte deflectora de um muro-cortina e utiliza um artifício para representar estruturas verticais (Hu, 2000): a parte vertical é aproximada por uma inclinação, por exemplo, a 10:1. Neste caso de estruturas verticais, o modelo não foi ainda validado para um número significativo de casos e é neste âmbito de colaboração que se enquadra o trabalho desta dissertação.

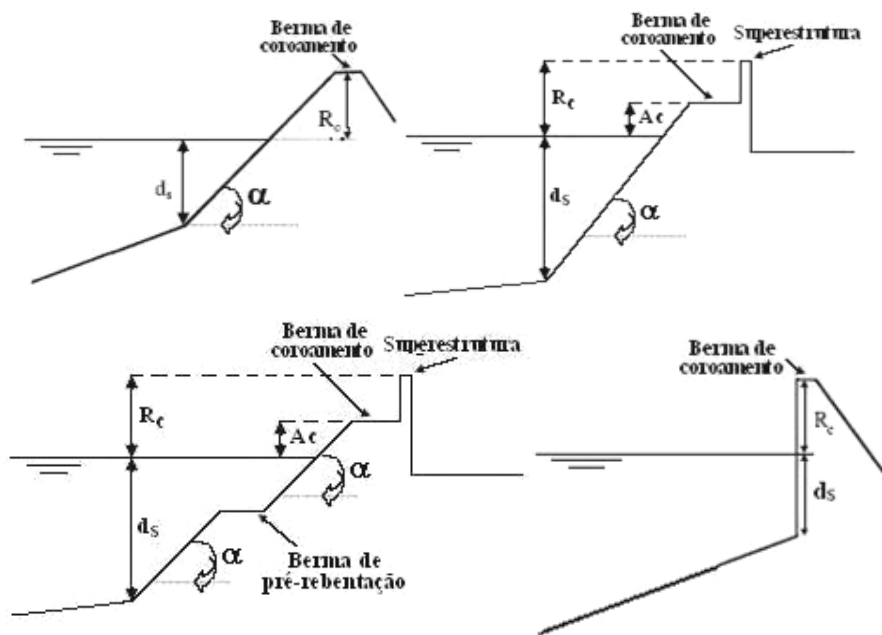


Figura 4.1 – Exemplo de configurações de estruturas possíveis de modelar com o AMAZON.

O AMAZON foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e tem uma interface bastante agradável e fácil de usar (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4).

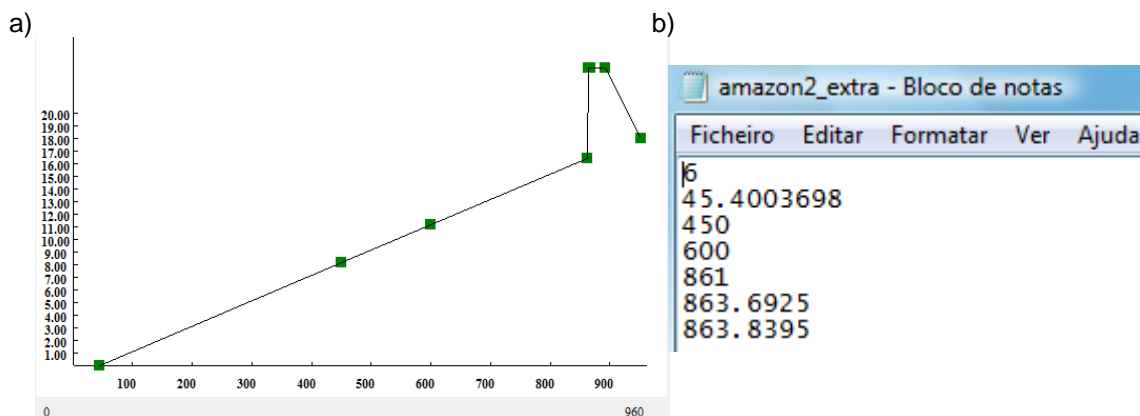


Figura 4.2 – Exemplos de introdução de dados no modelo AMAZON: a) interface de definição do perfil do “foreshore” e da estrutura à escala de protótipo; b) ficheiro de definição do número de sondas colocadas no modelo e sua localização ao longo do domínio.

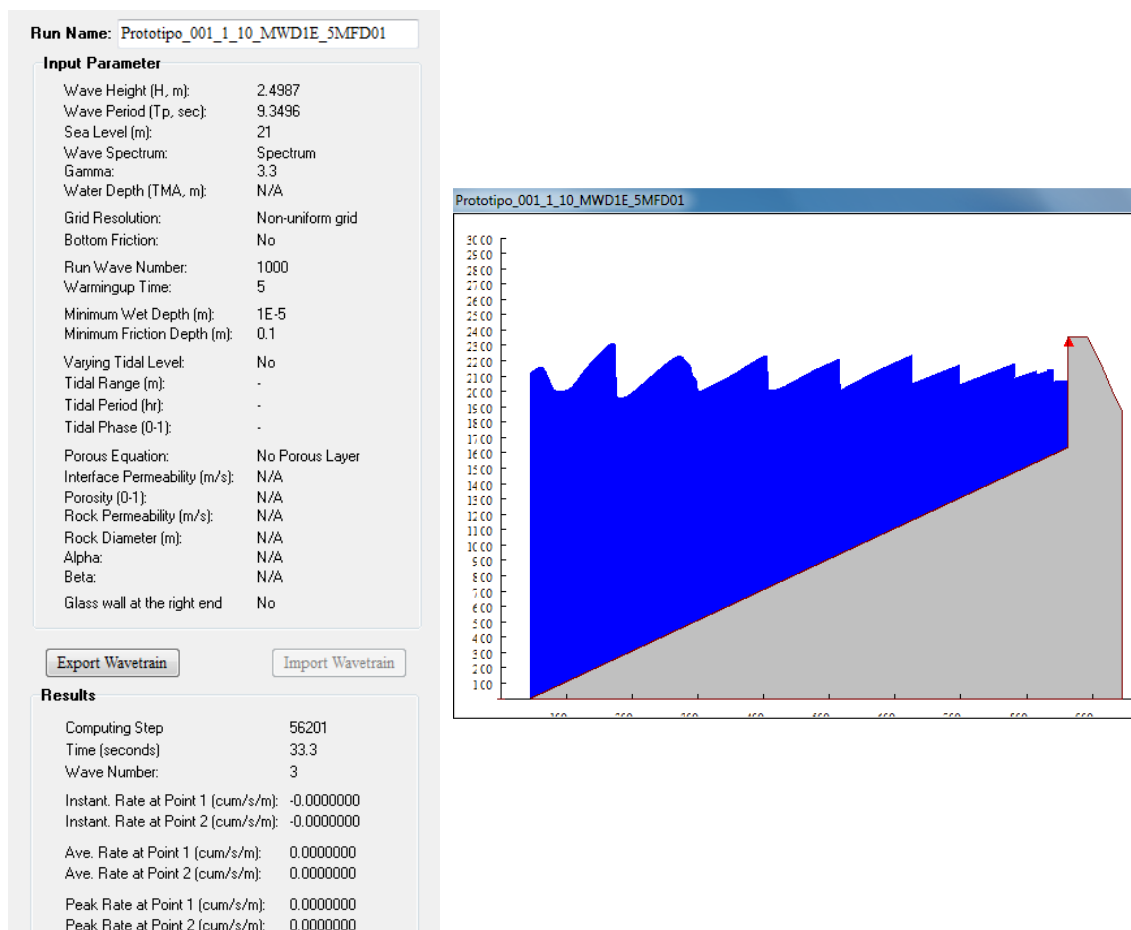
The screenshot shows the 'Run Parameters' dialog box with the following details:

- Run Title:** 1 10 MWDIE 5MFD01
- Enter Wave and Sea Level Conditions:**
  - Wave Height (Hs): 2.4987 m
  - Wave Spectrum: Jonswap
  - Wave Period (Tp): 9.3496 s
  - Gamma: 3.3
  - Water depth (TMA only): 999 m
  - Sea Level: 21 m
  - Buttons: Spectrum Table, Digitizing
  - Checkboxes: Time varying sea level, Glass wall at the right end
- Enter Grid Resolution and Friction:**
  - Checkboxes: Non-uniform Grid (checked), Bottom friction applied
  - Buttons: Resolution Table
  - Uniform Grid Resolution: 0
- Enter Wave Number:**
  - Wave Numbers: 1000
  - Warming-up time (in wave number): 5
- Define Observing Points:**
  - Point One: 863.693801 m
  - Point Two: 863.843403 m
- Drainage:**
  - Location: 863.993004 m
  - Capacity: 0 m<sup>3</sup>/s
- Define Observing Points:**
  - Checkboxes: Tidal boundary applied
  - Tidal Range: [ ] m
  - Tidal Period: [ ] hrs
  - Tidal Phase: [ ] 0 - 1
- Vertical Barrier:**
  - Checkboxes: Vertical barrier applied
  - Power "n" (calibration): 0
  - Location: 0 m
  - Bottom: 0 m
  - Top: 0 m
- Computing Parameters:**
  - Minimum wet depth: 1E-5 m
  - Minimum friction depth: 0.1 m

**Figura 4.3 – Interface de definição dos dados de entrada do modelo AMAZON.**

Como dados de entrada, o modelo necessita dos seguintes elementos:

- Perfil da estrutura/praias;
- Batimetria dos fundos adjacentes (“foreshore”);
- Características da camada porosa, caso exista: geometria, porosidade, diâmetro nominal do material constituinte e coeficientes de porosidade;
- Parâmetro de atrito de fundo (pode variar ao longo da estrutura e da batimetria);
- Nível do mar, que pode variar (adotando uma curva sinusoidal de maré ou uma série temporal definida pelo utilizador);
- Agitação incidente: o modelo permite a escolha de ondas sinusoidais ou de ondas irregulares definidas por um espectro empírico (e.g., JONSWAP, Pierson-Moskowitz) ou por um espectro definido pelo utilizador, ou ainda a introdução de uma série incidente proveniente, por exemplo, de modelação numérica ou de ensaios de modelo físico reduzido;
- Malha (uniforme/não uniforme, discretização);
- Outros parâmetros (e.g. profundidade mínima molhada, profundidade mínima de atrito).



**Figura 4.4 – Exemplos de saída de resultados numéricos e gráficos no modelo AMAZON.**

A profundidade mínima molhada é a profundidade limite (mínima) para a qual uma célula computacional é considerada seca. A profundidade mínima de atrito, outro elemento principal do modelo AMAZON, é utilizada para calcular uma perda de atrito equivalente quando a profundidade da água é muito pequena. Neste caso, o atrito de fundo, que representa a perda de energia devido a turbulência e atrito no perfil da estrutura e/ou no fundo, pode tornar-se muito grande em relação à velocidade, sendo necessário introduzir uma profundidade mínima de atrito.

O modelo AMAZON pode ser aplicado quer à escala de modelo, quer à escala de protótipo, sendo necessário para isso apenas escalar adequadamente os dados inseridos e alguns parâmetros utilizados no modelo numérico.

Permite obter, como resultados, séries temporais da elevação da superfície livre em diversos pontos do domínio, velocidades integradas na vertical e, através destas, a série temporal de caudais instantâneos e do caudal médio em vários pontos da estrutura galgada. A descrição detalhada do AMAZON e suas equações podem ser consultadas em Hu (2000) e Reis *et al.* (2008a,b, 2009a,b, 2011).

## 4.2. Seleção dos ensaios do CLASH a reproduzir com o modelo

Uma vez que se pretende estudar a aplicabilidade do modelo AMAZON (bidimensional) a estruturas verticais simples, escolheram-se da base de dados CLASH ensaios muito fiáveis

(RF=1), de geometria simples (CF=1), referentes a estruturas verticais ( $cota_d=0$ ,  $cota_{excl}=0$ ,  $cota_{incl}=0$ ,  $cota_u=0$ ), impermeáveis ( $\gamma_f=1$ ), sem bermas ( $R_c=A_c$ ,  $B=0$ ,  $h_b=0$ ,  $\tan\alpha_B=0$ ,  $B_h=0$ ,  $G_c=0$ ) nem banquetas do pé do talude ( $h_t=h$ ,  $B_t=0$ ) e com agitação normal à estrutura ( $\beta=0^\circ$ ). Desta forma, selecionaram-se 6 ensaios do grupo de ensaios designado por “502”: 502-003, 502-008, 502-034, 502-035, 502-043 e 502-044. Estes 6 ensaios satisfazem também as condições de aplicabilidade do modelo AMAZON.

Os parâmetros correspondentes a estes ensaios foram utilizados para a construção do perfil do “foreshore” e das estruturas verticais estudadas no modelo AMAZON. Note-se que ao se aplicar o modelo AMAZON aos ensaios selecionados, utilizaram-se malhas quadradas.

No Quadro 4.1, apresentam-se para os ensaios selecionados os intervalos de valores que foram considerados para alguns dos parâmetros já descritos no capítulo 3.

**Quadro 4.1 – Características dos 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.**

$T_{m-1,0 \text{ deep}}$ [s]	Mínimo	1.451
	Máximo	1.517
$T_{p \text{ deep}}$ [s]	Mínimo	1.652
	Máximo	1.707
$T_{p \text{ toe}}$ [s]	Mínimo	1.652
	Máximo	1.707
$H_{m0 \text{ deep}}$ [m]	Mínimo	0.06485
	Máximo	0.1479
$H_{m0 \text{ toe}}$ [m]	Mínimo	0.052
	Máximo	0.067
$m$ [-]	(-)	10,50
$h_{\text{deep}}$ [m]	Mínimo	0.7
	Máximo	0.7
$h$ [m]	Mínimo	0.09
	Máximo	0.16
$R_c$ [m]	Mínimo	0.085
	Máximo	0.15

## 5. Fórmulas Empíricas e Semi-Empíricas para Estruturas Verticais Simples

### 5.1. Descrição das fórmulas

As fórmulas empíricas para o cálculo do galgamento são desenvolvidas com base num ajuste de uma reta a resultados de modelos físicos, em que os parâmetros da reta (intersecção com o eixo dos  $yy$  e inclinação) correspondem aos coeficientes empíricos da fórmula. Numa fórmula semi-empírica existe previamente um desenvolvimento teórico do fenómeno.

Essas fórmulas, simples, rápidas e de fácil utilização, são elementos muito úteis no estudo preliminar do galgamento, mas apresentam limites de validade reduzidos por serem desenvolvidas com base em configurações de estruturas simples e condições específicas de agitação e de nível de maré.

Existem diferentes fórmulas na literatura para o cálculo do caudal médio galgado de uma estrutura. Nesta dissertação, para as condições de agitação dos dados do CLASH selecionados no capítulo 4, utilizaram-se as fórmulas de Van der Meer & Bruce (V&B) (2014), Goda (2008) e Hedges & Reis (H&R) (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015), que se apresentam de seguida

#### Fórmula de Van der Meer & Bruce (2014)

Esta fórmula é uma atualização das fórmulas propostas no EurOtop (Pullen *et al.*, 2007). As estruturas aqui abordadas têm todas *foreshore* por isso, nesta dissertação, foram utilizadas as fórmulas de V&B relativas a casos com *foreshore*. Estas fórmulas requerem a avaliação da condição de rebentação, dada da seguinte forma:

$$\frac{h^2}{H_{m0\ toe} L_{m-1,0}} \begin{cases} > 0.23 \text{ condição não impulsiva} \\ = 0.23 \text{ condição de transição} \\ < 0.23 \text{ condição impulsiva} \end{cases} \quad (5.1)$$

onde  $L_{m-1,0}$  é o comprimento de onda em grandes profundidades definido por:

$$L_{m-1,0} = \frac{gT_{m-1,0\ toe}^2}{2\pi} \quad (5.2)$$

Verificou-se que a condição de rebentação era impulsiva para todos os 6 ensaios 502 de estudo desta dissertação. Sendo assim, devem ser aplicadas as seguintes fórmulas:

$$q = \begin{cases} \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} 0.011 \left( \frac{H_{m0\ toe}}{h s_{m-1,0}} \right)^{0.5} e^{(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0\ toe}})} & \text{se } \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} < 1.35 \\ \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} 0.0014 \left( \frac{H_{m0\ toe}}{h s_{m-1,0}} \right)^{0.5} \left( \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} \right)^{-3} & \text{se } \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} > 1.35 \end{cases} \quad (5.3)$$

onde  $s_{m-1,0}$  é a declividade da onda calculada com  $L_{m-1,0}$ .

### Fórmula de Goda (2008)

A fórmula de Goda (2008) faz o cálculo do caudal médio galgado com base na seguinte expressão exponencial:

$$q = \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} e^{-(A+B\frac{R_c}{H_{m0\ toe}})} \quad (5.4)$$

Nesta dissertação utilizou-se, nos cálculos com esta fórmula, para o valor de  $H_{m0\ toe}$  o que consta na base de dados do CLASH, isto é, a altura significativa de onda em frente à estrutura obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro.

Na fórmula (5.4) A e B são coeficientes empíricos determinados por:

$$A = A_0 \tanh \left[ (0.956 + 4.44 \tan \theta) \left( \frac{h}{H_{m0\ toe}} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta \right) \right] \quad (5.5)$$

$$B = B_0 \tanh \left[ (0.822 - 2.22 \tan \theta) \left( \frac{h}{H_{m0\ toe}} + 0.578 + 2.22 \tan \theta \right) \right] \quad (5.6)$$

em que  $A_0 = 3.4$ ,  $B_0 = 2.3$  e  $\theta$  é o ângulo do talude em frente à estrutura – “foreshore”.

### Fórmula de Hedges & Reis (Reis et al., 2013; Silva, 2015)

Inicialmente, as fórmulas de Hedges & Reis foram desenvolvidas para estruturas em talude (Hedges & Reis, 1998, 2004). No entanto, recentemente, estas fórmulas foram calibradas e verificadas para estruturas verticais simples (Reis et al., 2013; Silva, 2015). As fórmulas de Hedges & Reis para estruturas em talude ou verticais são dadas por:

$$q = \begin{cases} \sqrt{gR_{max}^3} A \left( 1 - \frac{R_c}{\gamma_f R_{max}} \right)^B & \text{se } 0 \leq \frac{R_c}{\gamma_f R_{max}} < 1 \\ 0 & \text{se } \frac{R_c}{\gamma_f R_{max}} \geq 1 \end{cases} \quad (5.7)$$

onde  $R_{max}$  é o espraio máximo e A e B são coeficientes empíricos.  $R_{max}$  foi calculado para valores não excedidos em 37% e 99% dos casos,  $(R_{max})_{37\%100}$  e  $(R_{max})_{99\%100}$ , respetivamente, para registos de 100 ondas, da seguinte forma:

$$(R_{max})_{37\%100} = \begin{cases} (0.38 + 1.67\xi_p)H_s & \text{se } 0 < \xi_p \leq 2.2 \\ (4.56 - 0.23\xi_p)H_s & \text{se } 2.2 < \xi_p \leq 9 \\ 2.51H_s & \text{se } 9 < \xi_p \end{cases} \quad (5.8)$$

$$(R_{max})_{99\%100} = \begin{cases} (0.54 + 2.37\xi_p)H_s & \text{se } 0 < \xi_p \leq 2.2 \\ (6.45 - 0.32\xi_p)H_s & \text{se } 2.2 < \xi_p \leq 9 \\ 3.55H_s & \text{se } 9 < \xi_p \end{cases} \quad (5.9)$$

onde  $\xi_p$  é o número de Iribarren baseado no período de pico,  $T_p$ . Nesta dissertação utilizou-se  $H_s=H_{m0\ deep}$ , igual ao que consta na base de dados CLASH, ou seja, a altura de onda significativa,  $H_s$ , é igual à altura de onda obtida com o momento de ordem 0 ( $m_0$ ) do espectro em águas profundas (junto ao gerador).

Para estruturas verticais simples, os coeficientes A e B foram determinados por calibração com os dados CLASH, para valores de  $(R_{max})_{37\%100}$  e  $(R_{max})_{99\%100}$ , respetivamente, da seguinte forma (Silva, 2015):

$$\begin{aligned} (R_{max})_{37\%100}: \quad A &= 0.0037 \\ B &= 2.918 \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} (R_{max})_{99\%100}: \quad A &= 0.0015 \\ B &= 3.869 \end{aligned} \quad (5.11)$$

No Quadro 5.1 apresentam-se as condições de validade de aplicação das fórmulas de H&R onde  $L_{op\ deep}$  é o comprimento de onda em grandes profundidades baseado no período  $T_{p\ deep}$ .

**Quadro 5.1– Condições de aplicabilidade das fórmulas de Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015).**

Condições	Rebentação	Empolamento
I	$\frac{h}{H_{m0\ deep}} > 3$	$\frac{h}{L_{op\ deep}} > 0.05$
II	$1.65 < \frac{h}{H_{m0\ deep}} < 3$	$\frac{h}{L_{op\ deep}} > 0.05$
III	$\frac{h}{H_{m0\ deep}} > 3$	$\frac{h}{L_{op\ deep}} < 0.05$

## 5.2. Aplicação das fórmulas aos dados do CLASH

As fórmulas de Van der Meer & Bruce (2014), Goda (2008) e Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015) foram aplicadas aos dados do CLASH selecionados no capítulo 4. Assim, para cada uma das 6 condições, calculou-se o caudal médio galgado,  $q$ , por cada uma das fórmulas e comparou-se com os caudais apresentados no CLASH,  $q_{CLASH}$ .

Na Figura 5.1 apresentam-se todos os resultados das fórmulas juntamente com os do CLASH e na Figura 5.2 apresentam-se os resultados apenas para valores de caudal inferiores a  $2 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

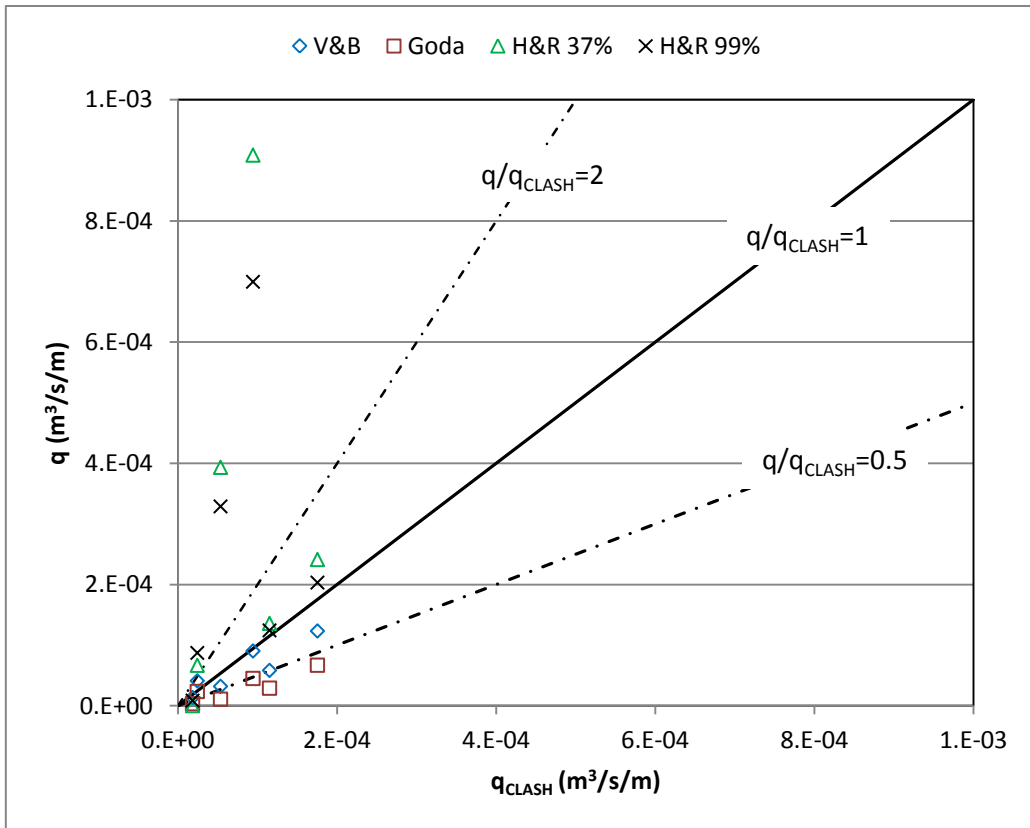


Figura 5.1 – Relação entre  $q$  e  $q_{\text{CLASH}}$  (escala de modelo).

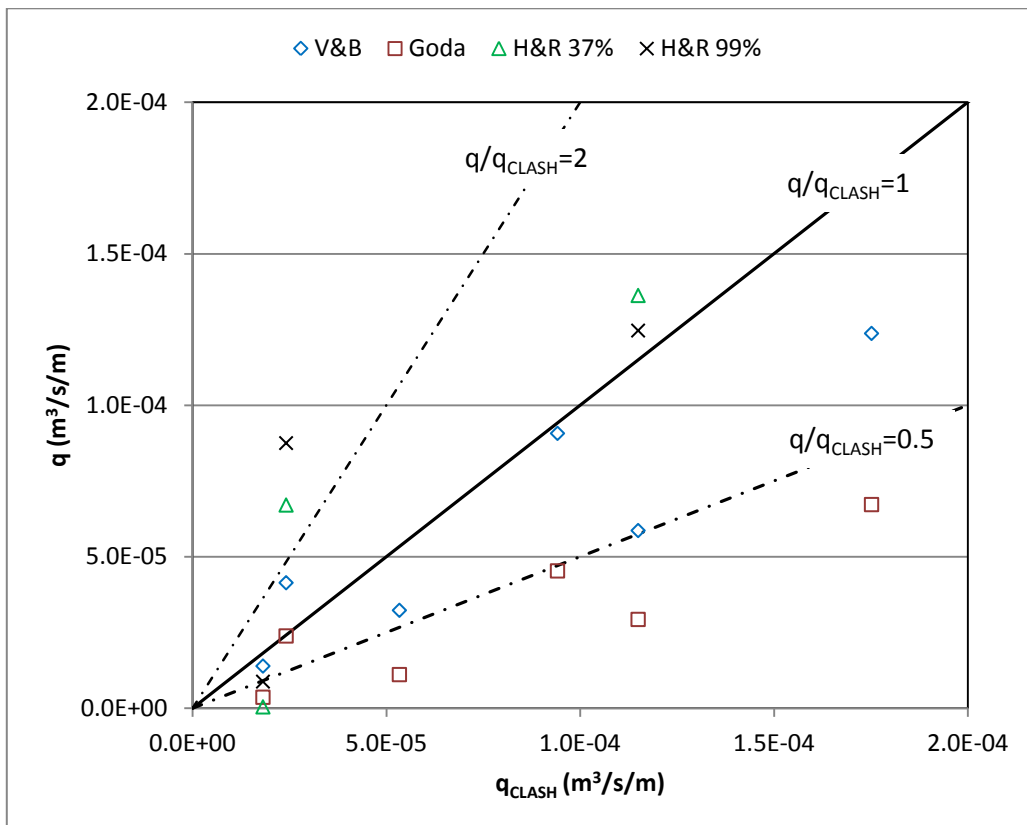


Figura 5.2 – Relação entre  $q$  e  $q_{\text{CLASH}}$  para  $q < 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (escala de modelo).

Da análise das figuras, observa-se que o ajuste dos resultados da fórmula de V&B aos dados CLASH se destaca nitidamente do ajuste das outras fórmulas, apresentando todos os resultados no intervalo  $0.5 < q/q_{CLASH} < 2$ , apesar de tender para subestimar  $q_{CLASH}$ . A fórmula de Goda apresenta maior tendência para subestimar os resultados CLASH que V&B, com a maioria dos resultados em  $q/q_{CLASH} < 0.5$ . As formulações H&R37% e H&R99% apresentam piores aproximações aos dados, mas apresentam a maioria dos valores acima de  $q_{CLASH}$ , isto é, sobrestimando os valores medidos. Para dois casos, os resultados são bastante superiores aos do CLASH, correspondentes aos ensaios 502-043 e 502-44. Estes ensaios são os que apresentam valores maiores de  $H_{m0\ deep}$  nos ensaios aqui analisados.

Para quantificar as diferenças entre os valores medidos e os obtidos pelas fórmulas, calcularam-se erros de três formas: erro relativo,  $(q - q_{CLASH})/q_{CLASH}$ , que permite analisar se as fórmulas estão ou não a subestimar os caudais médios medidos (Figura 5.3); erro relativo absoluto,  $|q - q_{CLASH}|/q_{CLASH}$  (Figura 5.4) e o erro absoluto,  $|q - q_{CLASH}|$ , isto é o valor absoluto da diferença entre os valores dos caudais calculados pelas fórmulas e os caudais do CLASH (Figura 5.5). Para cada um dos erros, calculou-se o seu valor mínimo, máximo a média e o desvio padrão dos 6 resultados.

Verifica-se que, tanto para a média, como para o desvio padrão, quer em termos relativos, quer em termos absolutos, as fórmulas de V&B e de Goda apresentam melhores resultados que as fórmulas de H&R. Comparando agora as fórmulas de V&B com as de Goda, V&B apresentam resultados ligeiramente melhores. As fórmulas de H&R 37% são as que apresentam piores resultados. Em termos relativos (Figura 5.3) nota-se que as fórmulas de V&B e as de Goda, em média, subestimam o caudal médio galgado, sendo que a de Goda subestima mais em média. Já as fórmulas de H&R apresentam médias positivas e maiores valores de desvio padrão.

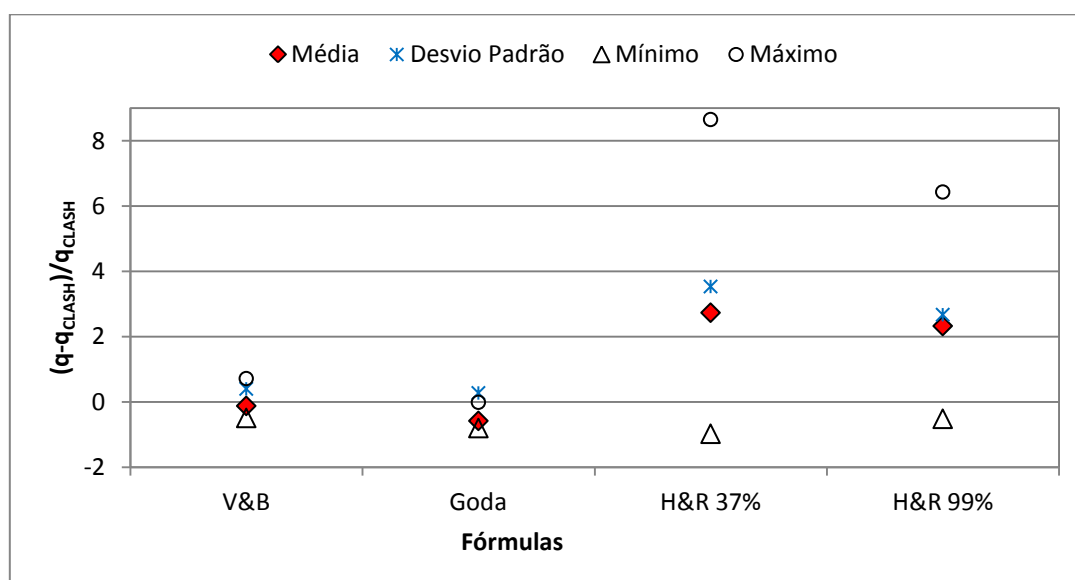


Figura 5.3 – Erro relativo das fórmulas.

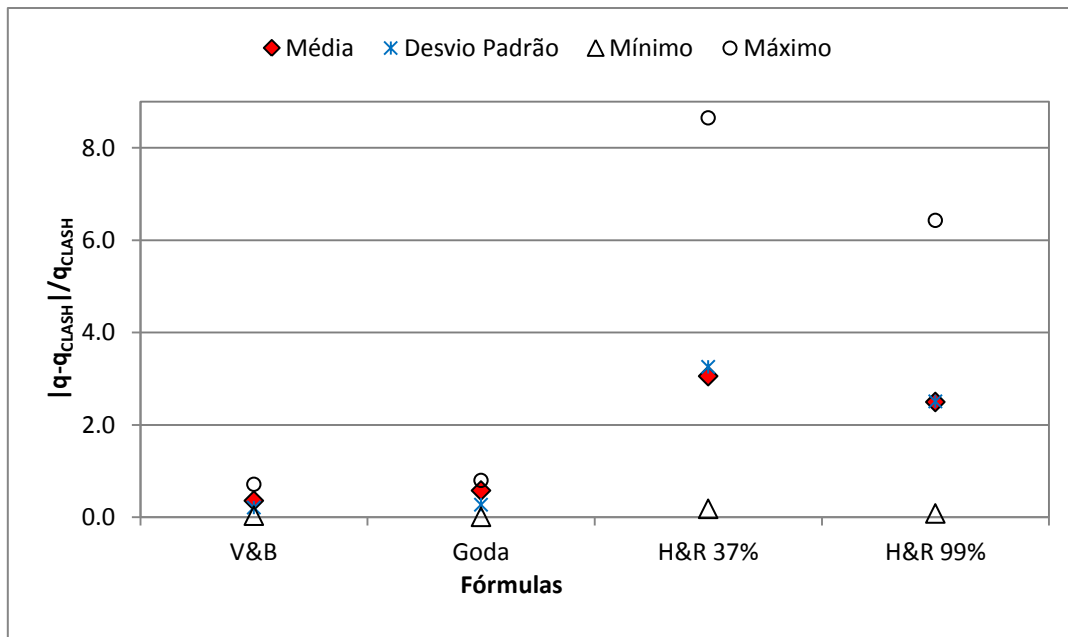


Figura 5.4 – Erro relativo absoluto das fórmulas.

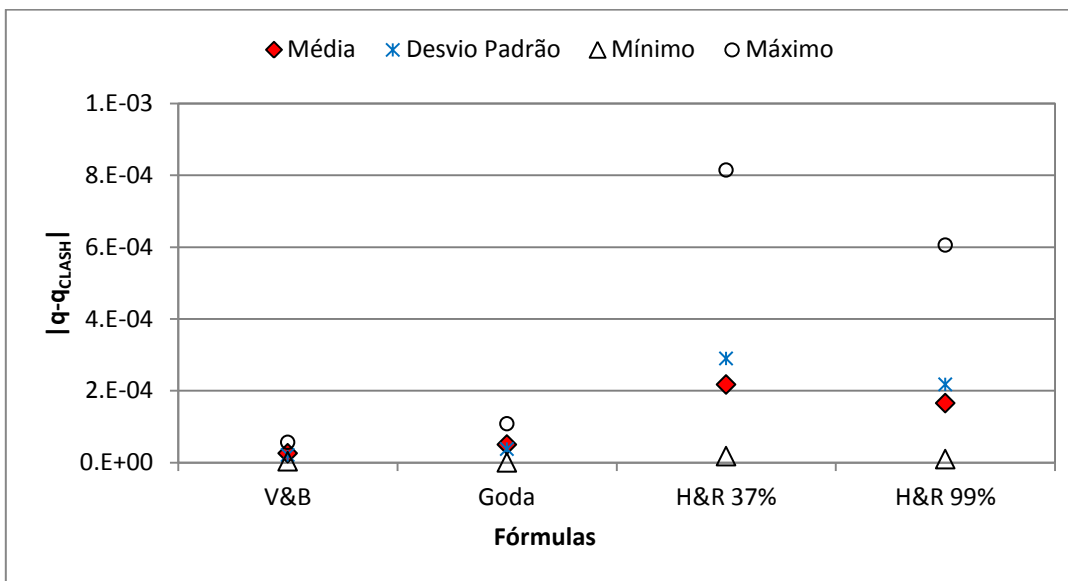


Figura 5.5 – Erro absoluto das fórmulas (escala de modelo).

É de referir que as condições dos 6 ensaios aqui analisados não se encontram dentro das condições de aplicabilidade das fórmulas de H&R segundo o Quadro 5.1, como se pode constatar no Quadro 5.2, que apresenta os valores mínimos e máximos, no que diz respeito às condições de rebentação e de empolamento, para os 6 ensaios 502 considerados. Este facto pode explicar os resultados obtidos por estas fórmulas para estes ensaios.

**Quadro 5.2 – Intervalo de valores para as condições de rebentação e empolamento para os 6 ensaios 502.**

$\frac{h}{H_{mo\ deep}}$	Mínimo	0.859
	Máximo	2.165
$\frac{h}{L_{op\ deep}}$	Mínimo	0.021
	Máximo	0.034



## 6. Aplicação do modelo AMAZON aos dados do CLASH

### 6.1. Descrição de alguns parâmetros de entrada do modelo

O modelo numérico AMAZON foi aplicado aos dados dos 6 ensaios 502 do CLASH (ver capítulo 4) que verificam as condições de aplicabilidade do modelo, isto é, verificam a condição de águas pouco profundas,  $h < h_{pp}$ , e garantem que  $h_{deep}/L_0$  está dentro do intervalo 0.016 e 0.19. Desta forma, as eventuais diferenças no caudal médio galgado não podem estar relacionadas com a aplicabilidade do modelo.

Para correr o modelo AMAZON começou-se por definir estrategicamente alguns pontos no domínio de cálculo, que inclui o perfil da estrutura e do fundo de inclinação constante, provenientes do CLASH, e a localização de 6 sondas no domínio, para obter informação da elevação da superfície livre ao longo do tempo (Figura 4.2 a e b).

A leitura do caudal médio galgado é feita num ponto localizado no coroamento da estrutura.

Definido no modelo AMAZON o domínio de cálculo e perfis do talude e da estrutura, introduziram-se os dados de cálculo, alguns deles variáveis entre ensaios, outros constantes, uns correspondentes a dados do CLASH e outros recomendados pelo autor do modelo AMAZON (Figura 4.3).

Entre os dados constantes, destacam-se:

- Para a digitalização do espectro incidente, são definidas as frequências mínima e máxima e o número de pontos do espectro: 0.02, 0.5 e 500 respetivamente (recomendado no modelo);
- Número de ondas a simular: 1000 ondas (valor recomendado na literatura, e.g. Pullen *et al.*, 2007);
- Número de ondas de “aquecimento” (Warming-up): igual a 5 ondas, neste caso (recomendado no modelo).

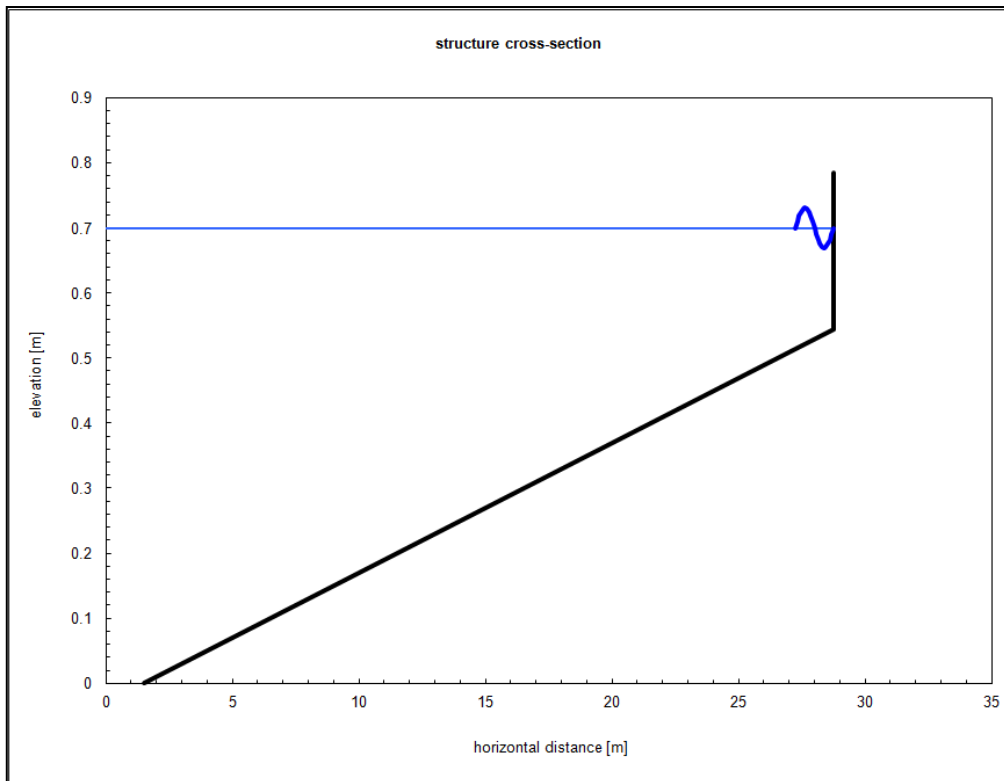
Entre os dados variáveis, destacam-se:

- Altura de onda significativa na entrada do domínio ( $H_{m0\ deep}$ );
- Período de pico na entrada do domínio ( $T_{p\ deep}$ );
- Nível do mar na entrada do domínio ( $h_{deep}$ ).

Segundo Shiach (2008), foi utilizado o espectro JONSWAP com fator de pico médio de 3.3 nos ensaios abordados nesta dissertação.

### 6.2. Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo

O primeiro ensaio simulado foi o ensaio 502-034, que foi simulado à escala de modelo com o domínio de cálculo que aparece na base de dados CLASH (Figura 6.1).



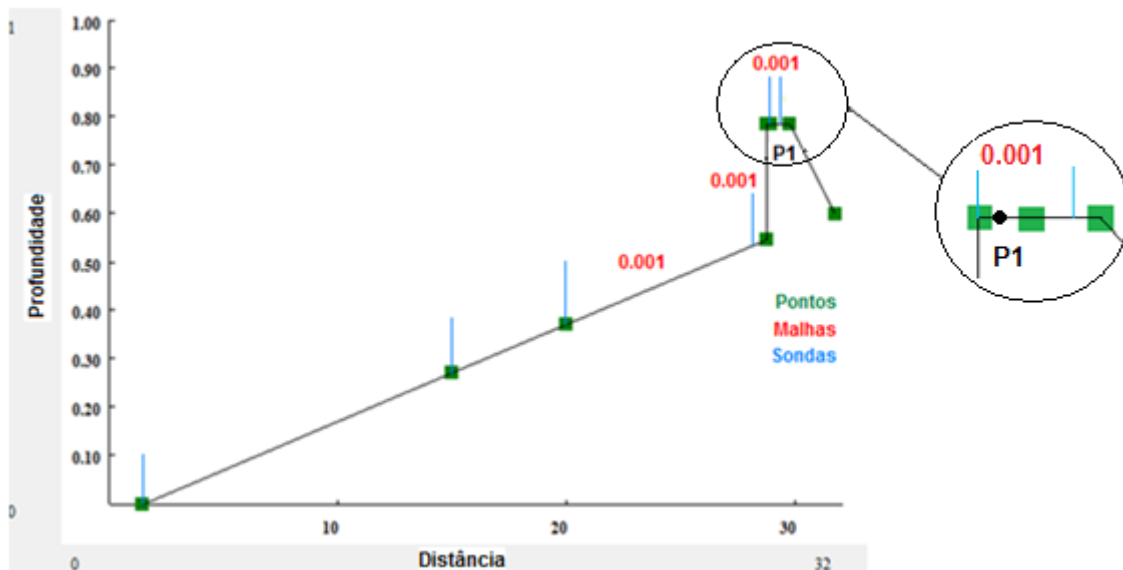
**Figura 6.1 – Exemplo da secção transversal de um dos casos de estruturas verticais simples da base de dados CLASH a estudar com o modelo AMAZON (escala de modelo).**

De modo a se obterem valores do caudal médio galgado,  $q$ , mais próximos do valor medido nos ensaios do CLASH,  $q_{CLASH}$ , procedeu-se à calibração de alguns dados de entrada do AMAZON.

Primeiro, analisou-se a influência da dimensão mínima da malha no caudal médio galgado. Para tal, analisaram-se 3 dimensões diferentes de malha quadrada: 0.005, 0.003 e 0.001 m, à escala do modelo. Utilizaram-se inicialmente os valores pré-definidos dos parâmetros de profundidade mínima molhada e de profundidade mínima de fricção.

É de referir que a análise da influência da dimensão mínima da malha apenas foi feita para a zona de interesse para o cálculo do caudal médio galgado, isto é, a zona imediatamente antes do pé da estrutura vertical, entre o pé da estrutura e o coroamento e zona imediatamente a seguir (Figura 6.2).

O Quadro 6.1 apresenta os resultados da análise de sensibilidade do AMAZON à dimensão mínima da malha para o ensaio 502-034, usando a escala do modelo, O valor do caudal médio galgado apresentado corresponde às medições feitas no ponto P1, Figura 6.2.



**Figura 6.2 – Exemplo dos perfis do “foreshore” e da estrutura e da localização das sondas no modelo AMAZON, para o ensaio 502-034, à escala de modelo, com malha=0.001 m na zona de interesse para o cálculo do caudal médio galgado.**

**Quadro 6.1 – Influência da dimensão mínima da malha no valor de  $q$  calculado pelo modelo AMAZON à escala de modelo para o ensaio 502-034.**

Dimensão mínima da Malha [m]	Escala de modelo	
	$q_{AMAZON}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	$q_{CLASH}$ [m <sup>3</sup> /s/m]
0.005	0	1.752x10 <sup>-4</sup>
0.003	0	
0.001	1x10 <sup>-7</sup>	

Com se pode observar, os valores dos caudais médios galgados obtidos com os parâmetros anteriores foram nulos em todas as malhas exceto para a malha=0.001 m, para a qual se obteve, de qualquer forma, um valor muito inferior ao valor do CLASH.

Sendo uma das possíveis razões para essa diferença a falta de precisão do modelo a uma escala pequena, resolveu-se correr o modelo à escala de protótipo para este ensaio. Para passar da escala do modelo para a escala do protótipo e considerando uma escala geométrica de 1:30 ( $N_L=30$ ), utilizou-se a relação de escalas entre modelo e protótipo baseadas na semelhança de Froude e que constam no Quadro 6.2.

Assim, a altura de onda no protótipo é igual à do modelo multiplicada por  $N_L$ . Procedeu-se da mesma forma para o período, multiplicando o do modelo por  $N_t$  e para o caudal médio galgado, multiplicando o do modelo por  $N_q$ , ambos obtidos com base no valor de  $N_L$ .

O Quadro 6.3 apresenta os resultados da análise de sensibilidade do AMAZON à dimensão mínima da malha para o ensaio 502-034, usando quer a escala do modelo, quer a do protótipo,

**Quadro 6.2 – Relação de escalas com base na semelhança de Froude (adaptado de Kortenhaus *et al.*, 2005).**

Parâmetro	Unidades	Escala
Comprimento	[m]	$N_L$
Tempo	[s]	$N_t = \sqrt{N_L}$
Caudal	[m <sup>3</sup> /s/m]	$N_q = N_L^{1.5}$

**Quadro 6.3 – Influência da dimensão mínima da malha no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de modelo e de protótipo para o ensaio 502-034.**

Dimensão mínima da Malha [m à escala do modelo]	Escala de protótipo			Escala de modelo		
	$q_{AMAZON}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	$q_{CLASH}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	Erro [%]	$q_{AMAZON}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	$q_{CLASH}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	Erro [%]
0.005	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.878 \times 10^{-2}$	-99.99	0	$1.752 \times 10^{-4}$	-100.00
0.003	$1.38 \times 10^{-5}$		-99.95	0		-100.00
0.001	$3.52 \times 10^{-5}$		-99.88	$1 \times 10^{-7}$		-99.94

Como se pode verificar, houve uma melhoria nos valores de q e, como tal, resolveu-se correr sempre o modelo AMAZON à escala de protótipo. Contudo, os valores de q continuavam pequenos em comparação com os valores medidos nos ensaios constantes na base de dados CLASH.

Assim, decidiu-se tentar ainda a dimensão mínima da malha de 0.0005 m e analisar também o facto de, por defeito, o modelo AMAZON aproximar a parede vertical através de um talude 10:1, por ser um modelo integrado na vertical. Para tal, analisou-se alternativamente um talude 20:1 (Quadro 6.4).

**Quadro 6.4 – Influência do talude de aproximação da estrutura vertical no valor de q calculado pelo modelo AMAZON à escala de protótipo para o ensaio 502-034.**

Dimensão mínima da Malha [m à escala do modelo]	$q_{CLASH}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	Talude 20:1		Talude 10:1		Tempo computacional aproximado [hora]
		$q_{AMAZON}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	Erro [%]	$q_{AMAZON}$ [m <sup>3</sup> /s/m]	Erro [%]	
0.005	$2.878 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-7}$	-100.00	$2.3 \times 10^{-6}$	-99.99	31
0.003		$2.7 \times 10^{-6}$	-99.99	$1.38 \times 10^{-5}$	-99.95	65
0.001		$8.4 \times 10^{-6}$	-99.97	$3.52 \times 10^{-5}$	-99.88	177
0.0005		$1.82 \times 10^{-5}$	-99.94	$8.81 \times 10^{-5}$	-99.69	360

Como se pode observar, a utilização de um talude a 20:1 como aproximação da parede vertical piora os resultados do AMAZON relativamente aos resultados obtidos com a utilização de um talude a 10:1.

A utilização da malha mínima de 0.0005 m melhora os resultados do AMAZON, mas o tempo computacional exigido é impraticável, pelo que se decidiu utilizar para todos os outros ensaios a malha mínima de 0.001 m, que apresenta uma melhor relação resultados / tempo de cálculo. Por fim, resolveu variar-se os valores da profundidade mínima molhada (entre  $1 \times 10^{-5}$  m e  $1 \times 10^{-4}$  m) e da profundidade mínima de fricção (entre 0.01 m e 0.1 m) para verificar o seu impacto nos valores de  $q$ . Verificou-se que os valores considerados, baseados nas recomendações do modelo, não tiveram qualquer impacto nos resultados de  $q$  obtidos.

Note-se que os resultados do AMAZON apresentados até agora foram realizados com a fronteira de entrada localizada no início do domínio de cálculo do CLASH. Este domínio é, em todos os casos, superior ao recomendado como ótimo pelos autores do modelo AMAZON, que sugerem que a distância máxima entre a fronteira de entrada do modelo e o pé da estrutura deve ser aproximadamente um comprimento de onda,  $L_0$  (equação 4.1). Assim, analisou-se, por fim, a influência no caudal médio galgado da utilização do domínio de cálculo de aproximadamente  $L_0$  até ao pé da estrutura vertical em vez do domínio do CLASH.

Uma vez que na base de dados do CLASH existem apenas as condições de agitação no início do domínio e no pé da estrutura, (pontos A e B, respetivamente, na Figura 6.3), utilizou-se a teoria linear das ondas para se obter as condições de agitação a  $L_0$  do pé da estrutura vertical (ponto C na Figura 6.3), admitindo que apenas se verifica empolamento entre os pontos A e C. Assim, o período de onda não se altera e a altura de onda é igual ao produto da altura de onda em A, dada pelo CLASH, e o coeficiente de empolamento, calculado utilizando a teoria linear (Dean & Dalrymple, 1991). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6.5.

Como se pode observar, apesar da aproximação feita através da teoria linear para determinar as condições de agitação a  $L_0$  do pé da estrutura, os resultados dos caudais médios galgados melhoraram significativamente, confirmando a importância da localização da fronteira de entrada para os resultados obtidos. Consequentemente resolveu-se correr o modelo AMAZON para os restantes ensaios com a fronteira de entrada localizada a  $L_0$  do pé da estrutura vertical. Como se pode verificar o melhor resultado obtido após a calibração do modelo foi alcançado para o ensaio 502-043, onde o caudal  $q_{AMAZON}$  sobrestima o caudal medido,  $q_{CLASH}$ , em 42.51%. Para os outros casos, o modelo AMAZON subestima os valores medidos em 49% a 91%.

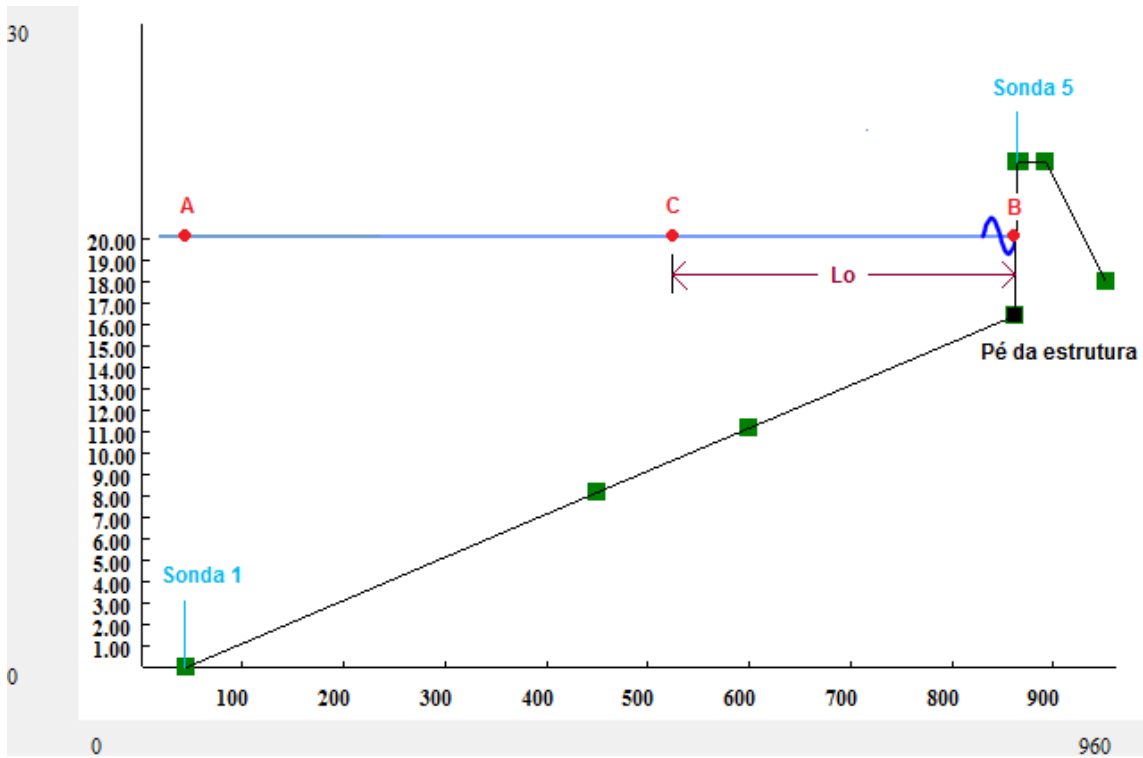


Figura 6.3 – Domínio de cálculo a considerar no modelo AMAZON.

Quadro 6.5 – Influência da localização da fronteira de entrada no valor de  $q$  calculado pelo modelo AMAZON à escala de protótipo, para o ensaio 502-034.

$q_{CLASH} [m^3/s/m]$	Fronteira de entrada a $L_0$ do pé da estrutura vertical		Fronteira de entrada no início do domínio total do CLASH	
	$q_{AMAZON} [m^3/s/m]$	Erro [%]	$q_{AMAZON} [m^3/s/m]$	Erro [%]
$2.878 \times 10^{-2}$	$6.471 \times 10^{-3}$	-77.52	$3.52 \times 10^{-5}$	-99.88

**Quadro 6.6 – Valores de  $q$  calculados pelo modelo AMAZON à escala de protótipo para os 6 ensaios considerados, com a fronteira de entrada a  $L_0$  do pé da estrutura vertical.**

Ensaio	$q_{AMAZON}$ [ $m^3/s/m$ ]	$q_{CLASH}$ [ $m^3/s/m$ ]	Erro [%]
502-003	$1.403 \times 10^{-3}$	$3.965 \times 10^{-3}$	-64.6
502-008	$2.672 \times 10^{-4}$	$2.984 \times 10^{-3}$	-91.0
502-034	$6.471 \times 10^{-3}$	$2.878 \times 10^{-2}$	-77.5
502-035	$3.721 \times 10^{-3}$	$1.889 \times 10^{-2}$	-80.3
502-043	$2.205 \times 10^{-2}$	$1.547 \times 10^{-2}$	42.5
502-044	$4.447 \times 10^{-3}$	$8.768 \times 10^{-3}$	-49.3

Na sonda 5 (Figura 6.3), o modelo AMAZON regista a superfície livre que resulta da existência, em simultâneo, das ondas incidentes e das refletidas pela estrutura. Não se espera, por isso, que as condições de agitação em B determinadas pelo AMAZON sejam iguais às que existem no CLASH no pé da estrutura, que apenas considera ondas incidentes em B (Figura 6.3), embora não espere que o período altere significativamente. Mesmo assim, decidiu-se analisar e apresentar as condições de agitação nesta zona (Quadro 6.7), incluindo apenas o cálculo do erro relativo ao período de pico.

**Quadro 6.7 – Condições de agitação no pé da estrutura vertical nos 6 ensaios 502 considerados (valores à escala de protótipo).**

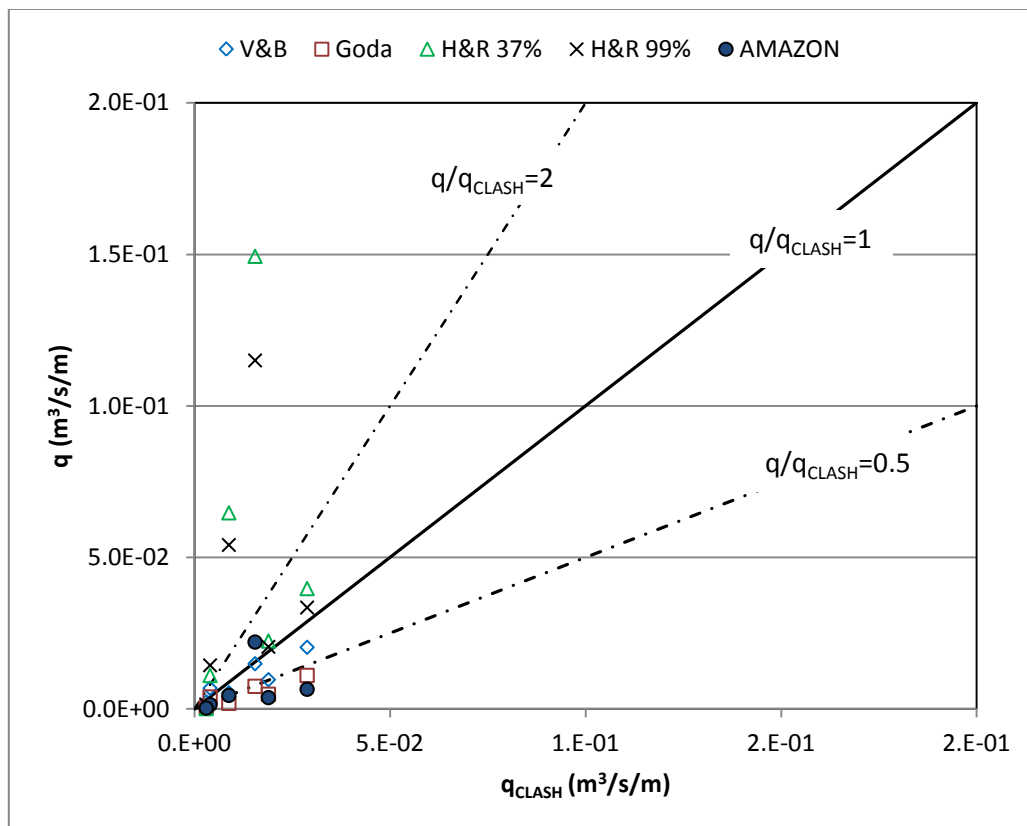
Ensaio	Escala de protótipo para domínio a $L_0$ do pé da estrutura vertical				
	$H_{m0}$ AMAZON [m]	$H_{m0}$ CLASH [m]	$T_p$ AMAZON [s]	$T_p$ CLASH [s]	Erro [%]
502-003	4.48610	2.00190	9.27390	9.3496	-0.81
502-008	3.92480	1.58700	9.27370	9.3496	-0.81
502-034	3.1141	1.82700	9.6195	9.3496	2.89
502-035	3.05420	1.55490	9.61890	9.3496	2.88
502-043	3.55450	2.00700	9.61970	9.0484	6.31
502-044	3.44690	1.60290	9.61940	9.0484	6.31

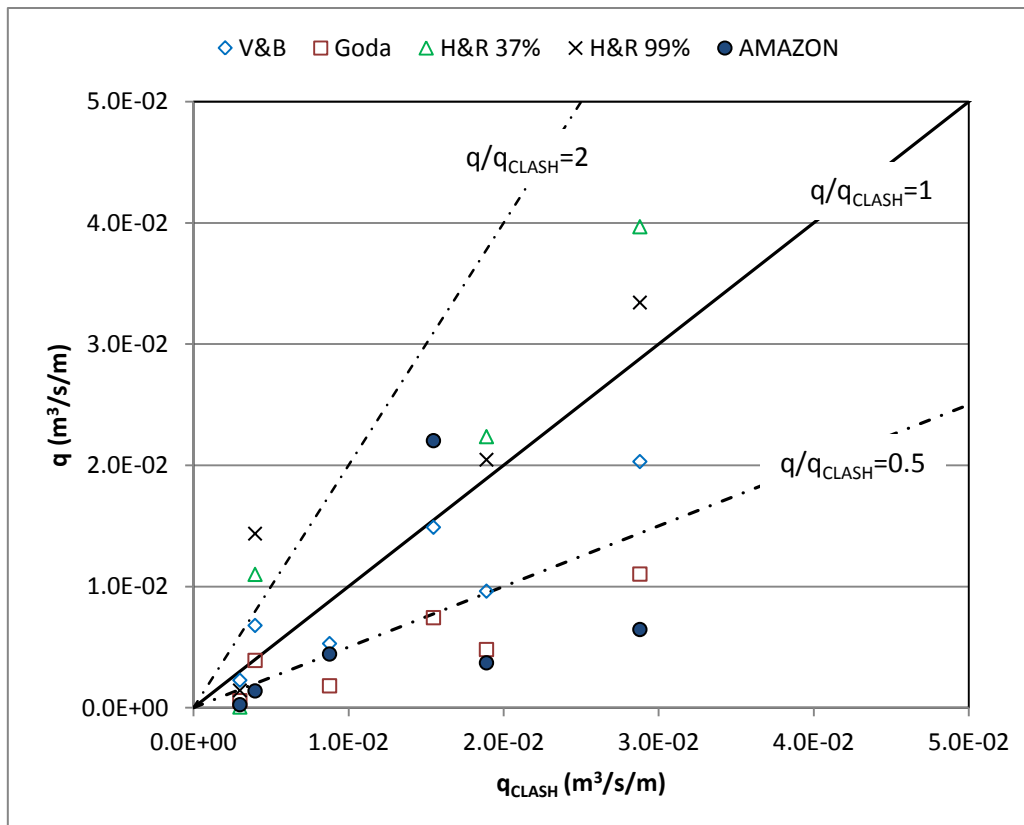
As diferenças relativas entre os valores de  $T_p$  obtidos com o modelo e nos ensaios são inferiores a 6.31% e ocorrem nos ensaios 502-043 e 502-044.

### 6.3. Comparação de resultados do AMAZON com os das fórmulas e do CLASH

O modelo AMAZON foi aplicado aos ensaios da base de dados do projeto CLASH selecionados no capítulo 4. Assim, calculou-se com o modelo o caudal médio galgado,  $q_{AMAZON}$ , e comparou-se com os caudais apresentados no CLASH,  $q_{CLASH}$ , e com os resultados das fórmulas de Van der Meer & Bruce (2014), Goda (2008) e Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015), todos considerados em valores de protótipo.

Na Figura 6.4 apresentam-se os resultados do modelo AMAZON juntamente com os do CLASH e das fórmulas e na Figura 6.5 apresentam-se os mesmos resultados para  $q < 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$ .





**Figura 6.5 – Relação entre  $q$  e  $q_{CLASH}$  para  $q < 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (valores à escala de protótipo).**

Da análise das Figuras 6.4 e 6.5, observa-se que os resultados do modelo AMAZON são, geralmente, próximos aos da fórmula de Goda (2008), ambos subestimando o valor medido de  $q$ .

Tal como para as fórmulas empíricas/semi-empíricas, para quantificar as diferenças entre os valores medidos e os obtidos pelo modelo AMAZON, calcularam-se erros de três formas: erro relativo,  $(q - q_{CLASH})/q_{CLASH}$  (Figura 6.6); erro relativo absoluto,  $|q - q_{CLASH}|/q_{CLASH}$  (Figura 6.7) e erro absoluto,  $|q - q_{CLASH}|$  (Figura 6.8). Para cada um dos erros, calculou-se o seu valor mínimo, máximo a médio e o desvio padrão dos 6 resultados. Verifica-se que, tanto para a média como para o desvio padrão, quer em termos relativos, quer em termos absolutos, os resultados do modelo AMAZON aproximam-se aos da fórmula de Goda. Contudo, Goda apresenta resultados ligeiramente melhores. Em termos relativos (Figura 6.6) nota-se que os resultados do modelo e os de Goda, em média, subestimam o caudal médio galgado, sendo que o do modelo subestima mais. Os resultados do modelo também apresentam maiores valores de desvio padrão.

É de referir que o facto de se ter decidido correr os ensaios à escala do protótipo, assumindo para tal que a escala dos ensaios era de 1:30, o facto de no pé da estrutura vertical os valores de  $H_{m0}$  no modelo poderem ser diferentes dos do CLASH e o facto de o modelo aproximar a parede vertical através de um talude 10:1 podem explicar os erros no desempenho do modelo AMAZON para estes ensaios.

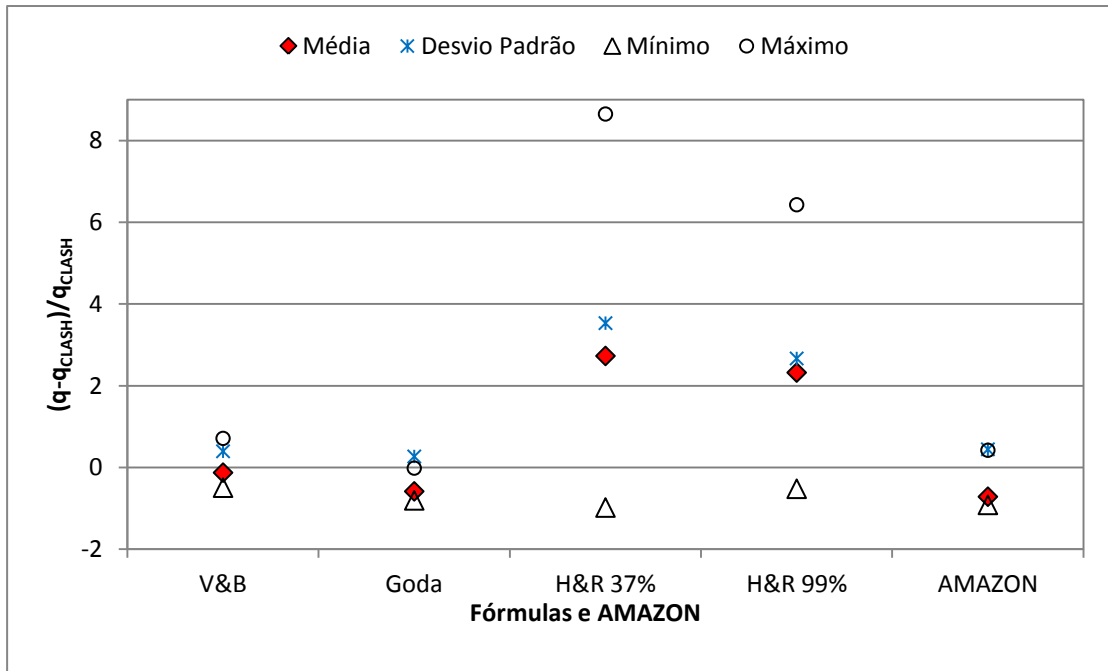


Figura 6.6 – Erro relativo.

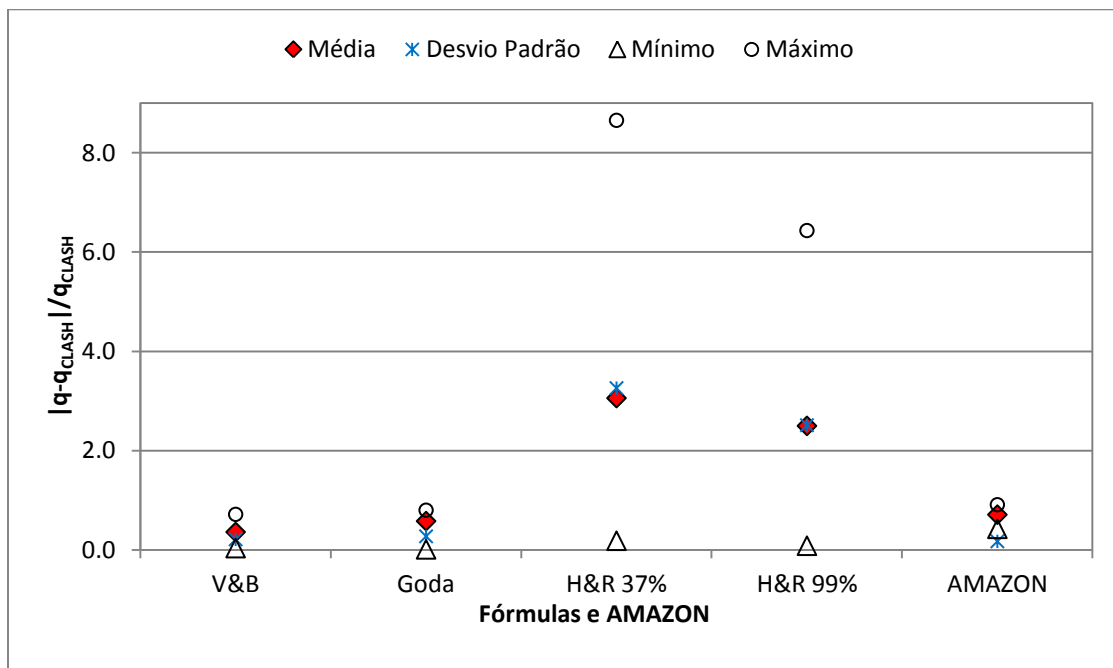


Figura 6.7 – Erro relativo absoluto.

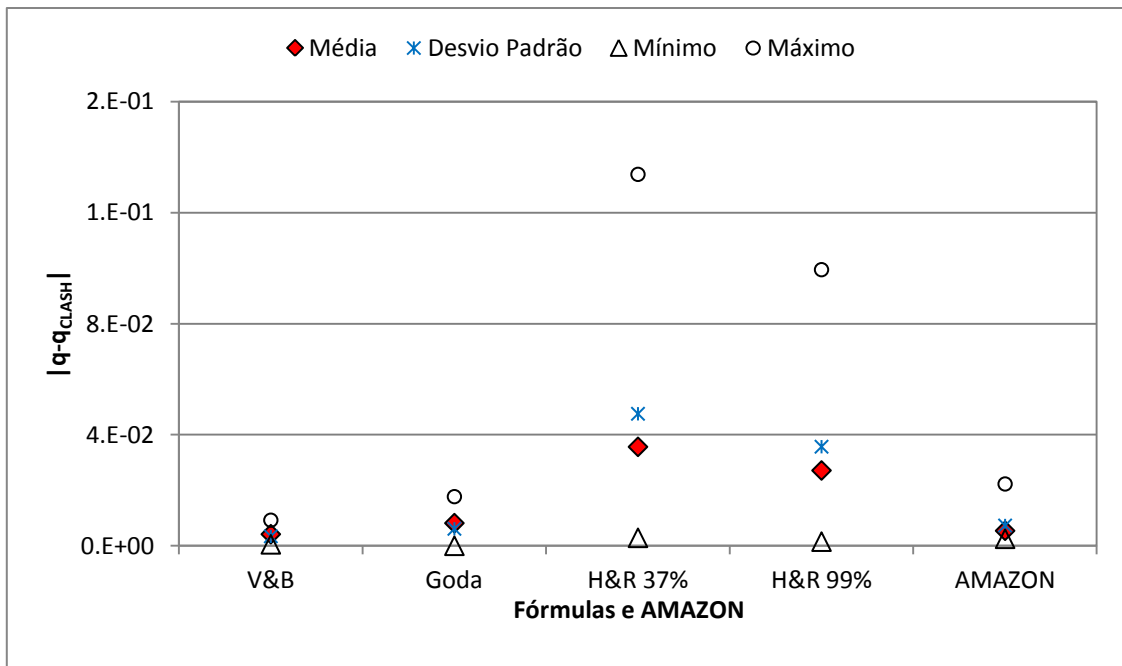


Figura 6.8 – Erro absoluto (valores à escala de protótipo).



## 7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O galgamento é o efeito que ocorre quando, pela ação das ondas do mar, a água passa sobre a cota de coroamento da estrutura de proteção costeira ou portuária, podendo atingir proporções de tal maneira preocupantes que podem levar a que pessoas e veículos sejam arrastados, edifícios e estradas sejam danificados, ou até a que a própria estrutura de proteção possa ser danificada.

É então importante, no dimensionamento de estruturas de proteção marginal, verificar que a estrutura cumpre os requisitos estruturais e funcionais, isto é, que o galgamento não ultrapassa os limites que permitem garantir a integridade da estrutura e a segurança de pessoas e infraestruturas por ela protegidas. No caso de estruturas verticais, o modelo numérico AMAZON não foi ainda validado para um número significativo de casos e é neste âmbito de colaboração que se enquadra o trabalho desta dissertação, pretendendo-se estudar a aplicabilidade do modelo ao cálculo do galgamento em estruturas marítimas verticais.

Sendo assim, a aplicação do modelo AMAZON foi feita para casos de estruturas marítimas verticais impermeáveis, para as quais existem resultados de ensaios em modelo físico bidimensional, realizados anteriormente e disponíveis na base de dados do projeto CLASH.

Assim, para um dos ensaios, foi feita uma análise da influência, no caudal médio galgado, de diferentes parâmetros ou opções de cálculo ou de domínio a utilizar nas corridas do modelo. Concretamente analisou-se a influência:

- da dimensão mínima da malha, que variou entre 0.0005 e 0.005 m;
- da escala do modelo. Como este modelo foi desenvolvido para ser aplicado à escala do protótipo, analisou-se a influência de se utilizar o modelo à escala dos ensaios ou à escala do protótipo, assumindo que a escala dos ensaios era de 1:30;
- Aproximação da parede vertical. No modelo, dado este ser integrado na vertical, não é possível considerar paredes verticais. Assim, a parede vertical da estrutura é aproximada através de um declive constante. Assim, analisou-se a influência do valor desse declive, considerando os taludes 10:1 (valor por defeito do modelo) e 20:1;
- dos valores dos parâmetros de entrada do modelo, profundidade mínima molhada e profundidade mínima de fricção.
- dimensão do domínio de cálculo. Como as equações do modelo são válidas para pequenas profundidades, é sugerido utilizar uma dimensão máxima entre a geração e a estrutura aproximadamente igual ao comprimento de onda em águas profundas,  $L_0$ . Assim, aplicou-se o modelo ao domínio total dos ensaios e a um domínio reduzido seguindo as indicações referidas.

Do resultado desta calibração foi decidido correr o modelo à escala de protótipo, com uma dimensão mínima da malha de 0.03 m, com uma aproximação para a parede vertical através de um talude a 10:1 e com um domínio de cálculo cuja fronteira de entrada está localizada a  $L_0$  do pé da estrutura vertical. A profundidade mínima molhada e a profundidade mínima de

fricção não mostraram ter praticamente nenhuma influência nos resultados, pelo que se usaram os valores por defeito destes parâmetros.

Para a validação do AMAZON, correu-se o modelo para os seis ensaios seleccionados na base de dados CLASH e foi feita uma comparação dos resultados do modelo com os resultados do CLASH no que respeita quer ao caudal médio galgado, quer às características da agitação no pé do talude.

Da validação do modelo observa-se que em geral, os valores de caudal medio galgado do modelo são inferiores aos do CLASH, isto é, subestimando o valor medido.

Compararam-se ainda os resultados do AMAZON com os obtidos pelas fórmulas de Van der Meer & Bruce (2014), Goda (2008) e Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015). Os resultados do modelo aproximaram-se dos do Goda, ambos com valores abaixo dos caudais médios galgados medidos que constam no CLASH, isto é, subestimam estes valores, o que embora implique menores custos, pode ter consequências negativas no que respeita à probabilidade da estrutura ter um galgamento superior ao permitido.

Em suma, uma vez que o modelo está em constante desenvolvimento, espera-se que no futuro seja uma ferramenta mais poderosa para o cálculo do caudal médio galgado em estruturas verticais. Contudo, enquanto não se fizerem melhorias no modelo e/ou não se estender a outros ensaios a análise feita no âmbito desta dissertação, os resultados sugerem que não há vantagem na sua utilização face às formulações empíricas e semi-empíricas disponíveis, tendo também em conta o significativo tempo computacional exigido para executar o AMAZON com a dimensão da malha escolhida.

Futuramente seria de extrema utilidade analisarem-se os parâmetros de entrada do modelo mais detalhadamente, como por exemplo testar outras inclinações para representação da parede vertical. Seria igualmente útil aplicar o modelo a outros ensaios que não foram aqui analisados.

## 8. Bibliografia

Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. (1991) - Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 2, World Scientific, 353 p.

Goda, Y. (2008) – Derivation of Unified Wave Overtopping Formulas for Seawalls with Smooth, Impermeable Surfaces based on selected CLASH Dataset. *Coastal Engineering*, 56:385-399.

Harten, A.; Lax, P.D.; Van Leer, B. (1983) – On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Review*, 25(1):35-61.

Hedges, T.S.; Reis, M.T. (1998) - Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model. *Water, Maritime & Energy Journal*, Proc. ICE, 130(1):1-10.

Hedges, T.S.; Reis, M.T. (2004) - Accounting for random wave run-up in overtopping predictions. *Maritime Engineering Journal*, Proc. ICE, 157(3): 113-122.

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.; 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.; 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.

Kortenhaus, A.; Van der Meer, J.W.; Burcharth, H.F.; Geeraerts, J.; Pullen, T.; Ingrand, D.; Troch, P. (2005) – *D40 report on conclusions of scale effects*. CLASH WP7- Report.

Mariz, M.S.C.O.R. (2012) – *Modelação Numérica do Galgamento em Estruturas Marítimas Porosas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, Portugal.

Mestre, R.M.M. (2015) – *Modelação Numérica da Reflexão e do Espraçamento em Praias e em Estruturas Marítimas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL), 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, Lisbon, Portugal.

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

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2003) – *Use of Numerical Models of Wave Overtopping: A Summary of Current Understanding*. ([www.hrwallingford.co.uk](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 (EA), Reino Unido, Expertise Netwerk Waterkeren (ENW), Países Baixos, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen (KFKI), 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.; Mestre, R.; Neves, M.G.; Hu, K.; Dias, J.; Mendonça, A.; Didier, E.; Fortes, C.J.E.M. (2015) – A new application of the nonlinear shallow water numerical model AMAZON to study OWC in vertical breakwaters. *Proc. SCACR2015 – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 28 de setembro a 1 de outubro, Florença, Itália.

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.; 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 2009*, 636-647, Thomas Telford, London, UK.

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.

Reis, M.T.; Neves, S.; Hedges, T.S.; Neves, M.G.; Hu, K.; Mase, H. (2013) – Extensão do Modelo de Galgamentos de Hedges & Reis a Estruturas Marítimas Verticais. *8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, PIANC, LNEC, Lisboa, Portugal, 10 e 11 de Outubro de 2013.

Shiach, J.B. (2008) – *Numerical Modelling of Wave Run-up and Overtopping using Depth Integrated Equations*. Tese de Doutoramento, Manchester Metropolitan University, UK.

Silva, J.M.G.G. (2015) – *Extensão da Fórmula Semi-empírica de Galgamentos de Hedges & Reis a Estruturas Marítimas Verticais*. Relatório de estágio para obtenção do grau de Membro Efetivo da Ordem dos Engenheiros, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal.

Steendam, G.J.; Van der Meer, J.W.; Verhaeghe, H.; Besley, P.; Franco, L.; Van Gent, M.R.A. (2004) – The International Database on Wave Overtopping. *Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 4301-4313.

USACE (2006) – *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*, U. S. Army Corps of Engineers (USACE), Washington, D.C. (6 volumes).

Van Albada, G.D.; Van Leer, B.; Roberts, W.W. Jr. (1982) - A comparative study of computational methods in cosmic gas dynamics. *Astronomy and Astrophysics*, 108:76-84.

Van der Meer, J.W.; Bruce, T. (2014) – New Physical Insights and Design Formulas on Wave Overtopping at Sloping and Vertical Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 140:5-10.

Van der Meer, J.W.; Verhaeghe, H.; Steendam, G.J. (2009) – The new Wave Overtopping Database for Coastal Structures. *Coastal Engineering*, 56:108-120.

Van Leer, B. (1979) - Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*, 32(1):101-136.

Verhaeghe, H. (2005) – *Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures*. Tese de Doutoramento, Universiteit Gent, Gent, Belgium.