

GALGAMENTO EM ESTRUTURAS VERTICAIS: COMPARAÇÃO DE DADOS DE ENSAIOS COM RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO AMAZON E DE FÓRMULAS EMPÍRICAS

M.T. Reis¹, M.G. Neves^{1,2}, J.J.J. Gaspar², K. Hu³

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

² Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia

³ Royal HaskoningDHV, Reino Unido

Resumo

Neste trabalho estuda-se o galgamento em estruturas marítimas verticais impermeáveis 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, os resultados de caudal médio galgado obtidos com o modelo 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 / semi-empíricas de Van der Meer & Bruce (2014), Goda (2008) e de Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013). 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 AMAZON, embora estes dois últimos apresentem valores bastante próximos. Assim, enquanto não se fizerem melhorias no modelo e/ou não se estender a outros ensaios a análise feita no âmbito deste trabalho, os resultados sugerem que não há vantagem na sua utilização face às formulações disponíveis, tendo também em conta o tempo computacional significativo exigido para executar o AMAZON.

1. Introdução

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 (espórões, 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 inundados, 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/semi-empíricas, que se baseiam em dados de ensaios em modelo físico e 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 validados, 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.

Com este trabalho, pretende-se estudar a aplicabilidade do modelo numérico AMAZON ao cálculo do galgamento em estruturas marítimas verticais. É um modelo numérico bidimensional baseado na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas. Originalmente foi concebido para estruturas impermeáveis e desde então tem estado em constante desenvolvimento.

Os resultados do modelo numérico AMAZON, obtidos no âmbito do presente trabalho, 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, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping* (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 analisar a aplicabilidade e a bondade dos seus resultados. São ainda comparados com os resultados das fórmulas empíricas/semi-empíricas mais usadas em projeto, de forma a verificar as principais vantagens e limitações da aplicação deste modelo a este tipo de estruturas.

Neste capítulo, apresenta-se uma breve introdução ao estudo. O capítulo 2 descreve a metodologia adotada, incluindo a descrição da base de dados CLASH e dos seus parâmetros, do modelo AMAZON e das fórmulas empíricas e semi-empíricas. O capítulo 3 diz respeito aos casos de estudo, apresentando a seleção dos dados dos ensaios, a aplicação das fórmulas e do modelo AMAZON a essas condições e a comparação de resultados. Por fim, no capítulo 4 apresentam-se as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

2. Metodologia

2.1 Base de Dados CLASH

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 neste trabalho para calibrar e validar os resultados do modelo numérico AMAZON.

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 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) ($H_{m0 \text{ deep}}$) [m];
- Altura significativa de onda obtida com o momento de ordem 0 (m_0) do espectro em frente à estrutura ($H_{m0 \text{ toe}}$) [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 ($T_p \text{ toe}$) [s];
- Ângulo de incidência da onda (β) 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 banquetta 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 banquetta 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) (θ) [-];

- 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 (γ_f ; Quadro 1) [-].

2 Fatores:

- Fator de complexidade da estrutura testada num ensaio da base de dados CLASH (CF; Quadro 2) [-];
- Fator de fiabilidade de um ensaio contido na base de dados CLASH (RF; Quadro 2) [-].

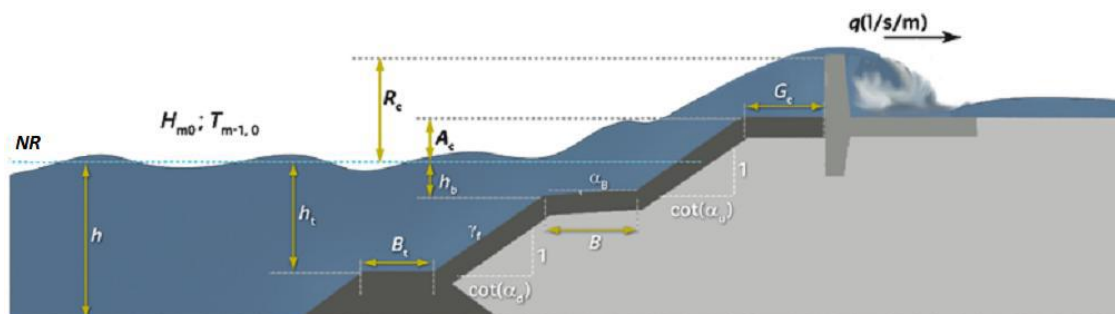


Figura 1 – Representação de alguns dos parâmetros da base de dados CLASH (adaptado de <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>).

Quadro 1 – Parâmetro de rugosidade / permeabilidade da estrutura, γ_f (adaptado de Steendam *et al.*, 2004).

Tipo de Material	γ_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 Antíferes, Seabeas	0.50
Acropodes TM , Xblock [®]	0.49
CORE-LOC [®] , HARO's	0.47
Enrocamento (1 camada, núcleo permeável)	0.45
Dolos	0.43
Enrocamento (2 camadas, núcleo permeável); Tetrápodes	0.40

Quadro 2 – Parâmetros CF e RF da base de dados CLASH (adaptado de Steendam *et al.*, 2004).

Nível	Complexidade da Geometria da Estrutura, CF	Fiabilidade da Representação da Estrutura, RF
Nível 1	Estrutura de geometria simples	Representação muito fiável
Nível 2	Estrutura de geometria consideravelmente simples	Representação fiável
Nível 3	Estrutura de geometria consideravelmente complexa	Representação menos fiável
Nível 4	Estrutura de geometria muito complexa	Representação pouco fiável

2.2 Modelo Numérico AMAZON

O modelo AMAZON (Hu, 2000), 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:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (1)$$

onde:

- L_0 é o comprimento de onda ao largo;
- T_p é o período de pico do espectro incidente;
- g é a aceleração da gravidade.

Uma vez que o modelo se baseia nas equações NLSW, deve-se ainda verificar que as condições em que se estão a aplicar o AMAZON são de águas pouco profundas, ou seja, que $d < L_0/20$, em que d é a profundidade no domínio de cálculo. Outra condição de aplicação do modelo é garantir que d/L_0 está no intervalo 0.016 a 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, 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 este trabalho.

O AMAZON foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e tem uma interface bastante agradável e fácil de usar (Figuras 2, 3 e 4).

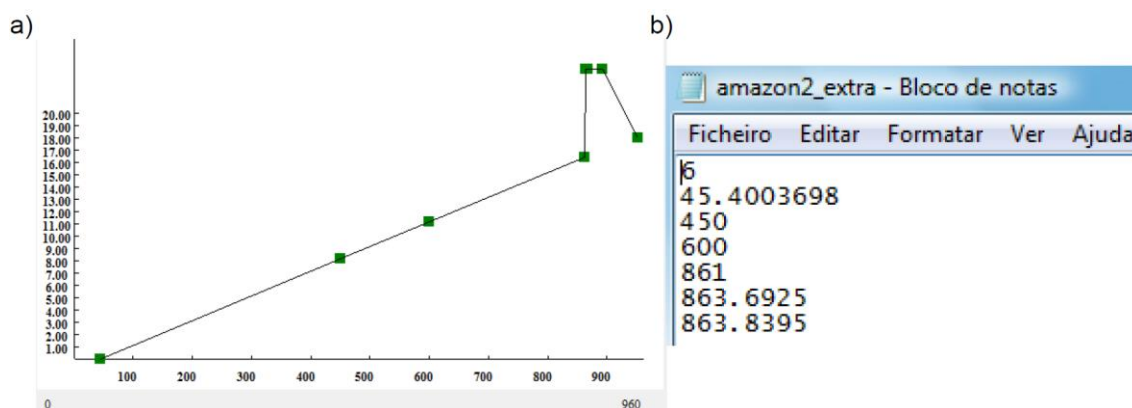


Figura 2 – Exemplos de introdução de dados no modelo AMAZON: a) interface de definição do perfil do *foreshore* e da estrutura à escala de protótipo; b) ficheiro de definição do número de sondas colocadas no modelo e sua localização ao longo do domínio.

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).

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

- Perfil da estrutura / praia;
- 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).

Run Parameters

Run Title: **1_10_MWD1E_5MFD01** OK Cancel

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 Spectrum Table Digitizing

☐ Time varying sea level ☐ Glass wall at the right end

Enter Grid Resolution and Friction

☒ Non-uniform Grid Resolution Table Uniform Grid Resolution: 0

☐ Bottom friction applied

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 m³/s

Define Observing Points

☐ Tidal boundary applied

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

Vertical Barrier ☐ 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 3 – Interface de definição dos dados de entrada do modelo AMAZON.

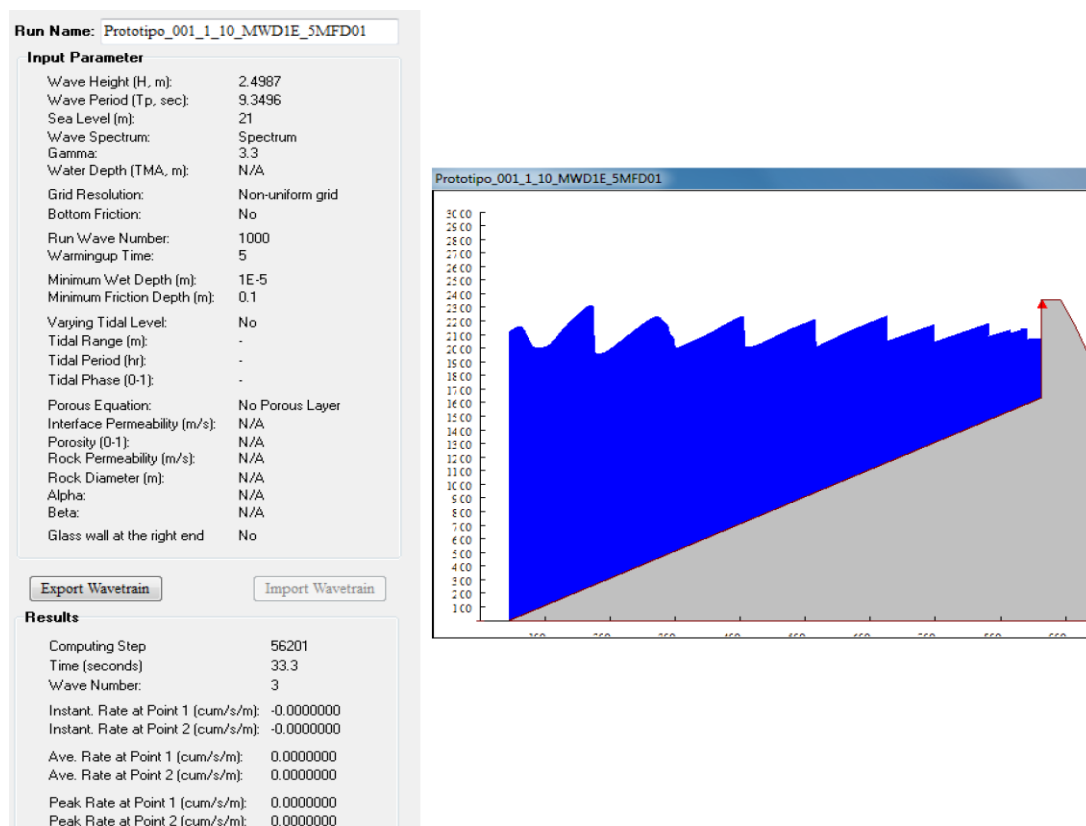


Figura 4 – Exemplos de saída de resultados numéricos e gráficos no modelo AMAZON.

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 à turbulência e ao 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.

2.3 Fórmulas Empíricas

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 (interseção 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/ou condições específicas de agitação e de nível de maré.

Existem diferentes fórmulas na literatura para o cálculo do caudal médio galgado de uma estrutura. Neste trabalho, para as condições de agitação dos dados do CLASH selecionados no capítulo 3, 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, foram aqui utilizadas as fórmulas de V&B relativas a casos com *foreshore*. Estas fórmulas requerem a avaliação da condição de rebentação, dada da seguinte forma:

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

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

$$L_{m-1,0} = \frac{gT_{m-1,0\ toe}^2}{2\pi} \quad (3)$$

Quando a condição de rebentação é impulsiva, devem ser aplicadas as seguintes fórmulas:

$$q = \begin{cases} \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} 0.011 \left(\frac{H_{m0\ toe}}{h s_{m-1,0}} \right)^{0.5} e^{\left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} \right)} & \text{se } \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} < 1.35 \\ \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} 0.0014 \left(\frac{H_{m0\ toe}}{h s_{m-1,0}} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0\ toe}} \right)^{-3} & \text{se } \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} > 1.35 \end{cases} \quad (4)$$

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:

$$q = \sqrt{gH_{m0\ toe}^3} e^{-\left(A + B \frac{R_c}{H_{m0\ toe}} \right)} \quad (5)$$

Neste trabalho 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 eq. 5 A e B são coeficientes empíricos determinados por:

$$A = A_0 \tanh \left[(0.956 + 4.44 \tan \theta) \left(\frac{h}{H_{m0\ toe}} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta \right) \right] \quad (6)$$

$$B = B_0 \tanh \left[(0.822 - 2.22 \tan \theta) \left(\frac{h}{H_{m0 \text{ toe}}} + 0.578 + 2.22 \tan \theta \right) \right] \quad (7)$$

em que $A_0 = 3.4$, $B_0 = 2.3$ e θ 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:

$$q = \begin{cases} \sqrt{gR_{\max}^3} A \left(1 - \frac{R_c}{\gamma_f R_{\max}} \right)^B & \text{se } 0 \leq \frac{R_c}{\gamma_f R_{\max}} < 1 \\ 0 & \text{se } \frac{R_c}{\gamma_f R_{\max}} \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

onde R_{\max} é o espriamento 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:

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

$$(R_{\max})_{99\%100} = \begin{cases} (0.54 + 2.37\xi_p)H_s & \text{se } 0 < \xi_p \leq 2.2 \\ (6.45 - 0.32\xi_p)H_s & \text{se } 2.2 < \xi_p \leq 9 \\ 3.55H_s & \text{se } 9 < \xi_p \end{cases} \quad (10)$$

onde ξ_p é o número de Iribarren baseado no período de pico, T_p . Neste artigo utilizou-se $H_s = H_{m0 \text{ deep}}$, 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):

$$(R_{\max})_{37\%100}: A = 0.0037; B = 2.918 \quad (11)$$

$$(R_{\max})_{99\%100}: A = 0.0015; B = 3.869 \quad (12)$$

No Quadro 3 apresentam-se as condições de validade de aplicação das fórmulas de H&R onde $L_{op \text{ deep}}$ é o comprimento de onda em grandes profundidades baseado no período $T_p \text{ deep}$.

Quadro 3 – Condições de aplicabilidade das fórmulas de Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013; Silva, 2015).

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

3. Casos de Estudo

3.1 Seleção dos Dados

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 ($cot\alpha_d=0$, $cot\alpha_{excl}=0$, $cot\alpha_{incl}=0$, $cot\alpha_u=0$), 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, apresentam-se, para os ensaios selecionados, os intervalos de valores que foram considerados para alguns dos parâmetros já descritos no capítulo 2.

Quadro 4 – Características dos 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.

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

3.2 Aplicação das Fórmulas

As fórmulas de Van der Meer & Bruce (V&B), Goda e Hedges & Reis (H&R) foram aplicadas aos dados do CLASH selecionados na secção anterior. 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} (Quadro 5).

Quadro 5 – Comparação dos valores de q obtidos pelas fórmulas empíricas com os dos 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.

Ensaio	q (m ³ /s/m)				
	CLASH	V&B	Goda	H&R37%	H&R99%
502-003	2.41E-05	4.14E-05	2.38E-05	6.71E-05	8.75E-05
502-008	1.82E-05	1.39E-05	3.62E-06	4.53E-07	8.78E-06
502-034	1.75E-04	1.24E-04	6.72E-05	2.42E-04	2.04E-04
502-035	1.15E-04	5.86E-05	2.93E-05	1.36E-04	1.25E-04
502-043	9.41E-05	9.07E-05	4.53E-05	9.09E-04	7.00E-04
502-044	5.34E-05	3.23E-05	1.11E-05	3.94E-04	3.29E-04

Da análise do Quadro 5 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 os ensaios 502-043 e 502-044, os resultados são bastante superiores aos do CLASH, sendo estes ensaios os que apresentam valores maiores de $H_{m0\ deep}$.

Para quantificar as diferenças entre os valores medidos e os obtidos pelas fórmulas, calcularam-se erros de três formas (Quadro 6): erro relativo, $(q - q_{CLASH})/q_{CLASH}$, que permite analisar se as fórmulas estão ou não a subestimar os caudais médios medidos; 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 e o erro relativo absoluto, $|q - q_{CLASH}|/q_{CLASH}$. Para cada um dos erros, calculou-se a média (μ), o desvio padrão (σ) e os valores mínimo (Min) e máximo (Max).

Quadro 6 – Erros das fórmulas empíricas para os 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.

Fórmula	Erros			
	Parâmetro Estatístico	$(q - q_{CLASH})/q_{CLASH}$	$ q - q_{CLASH} $	$ q - q_{CLASH} /q_{CLASH}$
V&B	μ	-1.22E-01	2.56E-05	3.61E-01
	σ	4.00E-01	2.10E-05	2.12E-01
	Min	-4.90E-01	3.44E-06	3.66E-02
	Max	7.16E-01	5.63E-05	7.16E-01
Goda	μ	-5.81E-01	4.99E-05	5.81E-01
	σ	2.74E-01	3.75E-05	2.74E-01
	Min	-8.00E-01	2.79E-07	1.16E-02
	Max	-1.16E-02	1.08E-04	8.00E-01
H&R37%	μ	2.73E+00	2.17E-04	3.06E+00
	σ	3.54E+00	2.90E-04	3.26E+00
	Min	-9.75E-01	1.77E-05	1.85E-01
	Max	8.65E+00	8.15E-04	8.65E+00
H&R99%	μ	2.33E+00	1.65E-04	2.50E+00
	σ	2.67E+00	2.18E-04	2.51E+00
	Min	-5.16E-01	9.38E-06	8.42E-02
	Max	6.43E+00	6.06E-04	6.43E+00

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&R37% são as que apresentam piores resultados. Em termos relativos 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.

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 3, como se pode constatar no Quadro 7, 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 7 – Intervalo de valores para as condições de rebentação e empolamento para os 6 ensaios 502.

$\frac{h}{H_{m0 \text{ deep}}}$	Min	0.859
	Max	2.165
$\frac{h}{L_{op \text{ deep}}}$	Min	0.021
	Max	0.034

3.3 Aplicação do AMAZON

O modelo numérico AMAZON foi aplicado aos dados dos 6 ensaios 502 do CLASH (ver secção 3.1) que verificam as condições de aplicabilidade do modelo, isto é, verificam a condição de águas pouco profundas, $d < L_0/20$, e garantem que h_{deep}/L_0 está dentro do intervalo 0.016-0.19. 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 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 os 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 3).

Entre os dados constantes, destacam-se:

- Para a digitalização do espectro incidente, são definidos 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 (*Wave Numbers*): 1000 ondas (valor recomendado na literatura, e.g. Pullen *et al.*, 2007);
- Número de ondas de “aquecimento” (*Warming-up time*): igual a 5 ondas, neste caso (recomendado no modelo).

Entre os dados variáveis, destacam-se:

- Altura de onda significativa na entrada do domínio ($H_s = H_{m0 \text{ deep}}$);
- Período de pico na entrada do domínio ($T_p = T_{p \text{ deep}}$);
- Nível do mar na entrada do domínio (*Sea Level* = h_{deep}).

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

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, simulando os ensaios à escala de modelo e com o domínio de cálculo que aparece na base de dados CLASH (Gaspar, 2016). 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.

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, utilizou-se a relação de escalas entre modelo e protótipo baseada na semelhança de Froude. Verificou-se uma melhoria nos valores de q e, como tal, resolveu-se correr o modelo AMAZON sempre 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, o que melhorou os resultados do AMAZON. No entanto, o tempo computacional exigido era impraticável, pelo que se utilizou, para todos os outros ensaios, a malha mínima de 0.001 m, que apresenta uma melhor relação resultados / tempo de cálculo.

Seguidamente, analisou-se 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, o que piorou os resultados do AMAZON relativamente aos resultados obtidos com a utilização de um talude a 10:1.

Depois, variaram-se os valores da profundidade mínima molhada (entre 1×10^{-5} a 1×10^{-4} m) e da profundidade mínima de fricção (entre 0.01 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.

Por fim, analisou-se a influência, no caudal médio galgado, da utilização do domínio de cálculo de aproximadamente L_0 até ao pé da estrutura vertical (eq. 1), em vez do domínio mais extenso do CLASH. Apesar da aproximação feita através da teoria linear para determinar as condições de agitação a L_0 do pé da estrutura (Gaspar, 2016), os resultados dos caudais médios galgados melhoraram significativamente, confirmando a importância da localização da fronteira de entrada do AMAZON para os resultados obtidos. Consequentemente resolveu-se correr o modelo para os restantes ensaios com a fronteira de entrada localizada a L_0 do pé da estrutura vertical (Quadros 8 e 9).

Quadro 8 – Comparação dos valores de q calculados pelo modelo AMAZON (à escala de protótipo, com a fronteira de entrada a L_0 do pé da estrutura vertical) com os dos 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.

Ensaio	$q_{\text{CLASH}} [\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$	$q_{\text{AMAZON}} [\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$
502-003	3.965×10^{-3}	1.403×10^{-3}
502-008	2.984×10^{-3}	2.672×10^{-4}
502-034	2.878×10^{-2}	6.471×10^{-3}
502-035	1.889×10^{-2}	3.721×10^{-3}
502-043	1.547×10^{-2}	2.205×10^{-2}
502-044	8.768×10^{-3}	4.447×10^{-3}

Quadro 9 – Erros do modelo AMAZON para os 6 ensaios 502 extraídos da base de dados CLASH.

Erros			
Parâmetro Estatístico	$(q - q_{\text{CLASH}})/q_{\text{CLASH}}$	$ q - q_{\text{CLASH}} $	$ q - q_{\text{CLASH}} /q_{\text{CLASH}}$
μ	-7.11E-01	5.45E-03	7.11E-01
σ	4.48E-01	7.35E-03	1.72E-01
Min	-9.10E-01	2.56E-03	4.25E-01
Max	4.25E-01	2.23E-02	9.10E-01

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} . Para os outros casos, o modelo AMAZON subestima os valores medidos.

3.4 Comparação de Resultados

O modelo AMAZON foi aplicado aos ensaios da base de dados do projeto CLASH seleccionados na secção 3.1. 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 (V&B), Goda e Hedges & Reis (H&R), todos considerados em valores de protótipo.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados do modelo AMAZON juntamente com os do CLASH e das fórmulas empíricas. Na Figura 6 apresentam-se os mesmos resultados para $q < 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$. Da análise das figuras observa-se que os resultados do modelo AMAZON são, geralmente, próximos aos da fórmula de Goda, ambos subestimando o valor medido de q . Contudo, Goda apresenta resultados ligeiramente melhores. A fórmula de Van der Meer & Bruce apresenta as melhores aproximações aos caudais médios medidos que constam na base de dados do CLASH.

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.

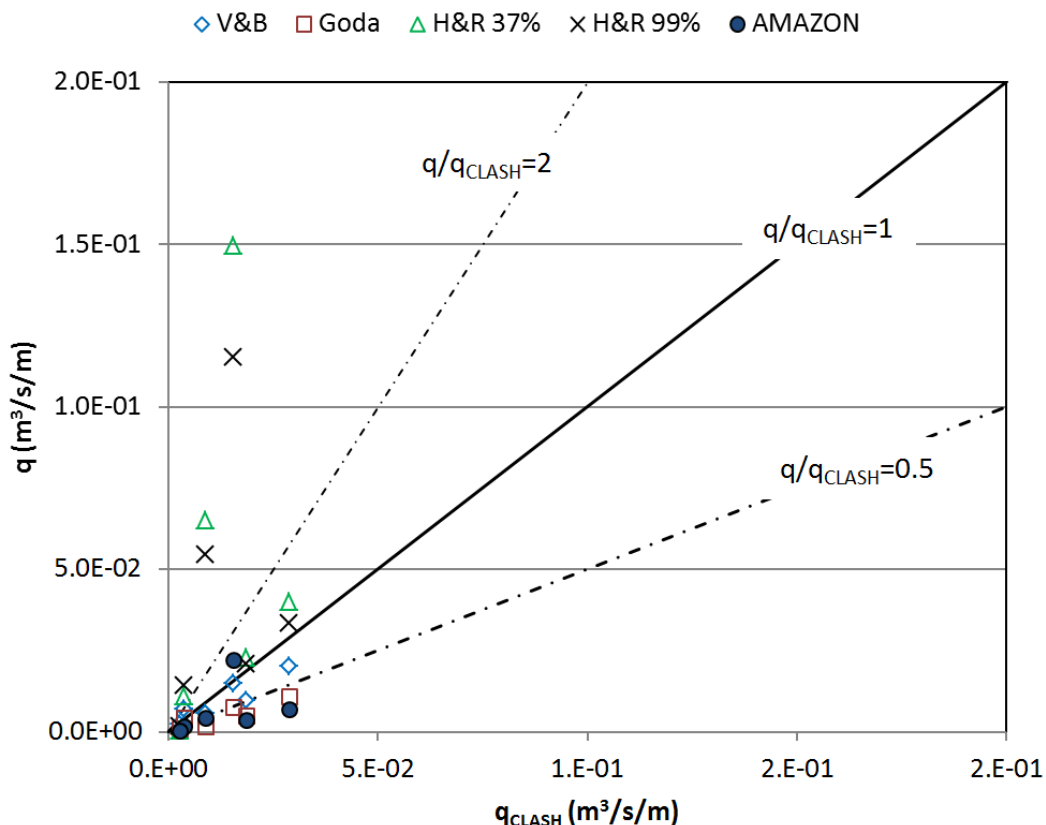


Figura 5 – Relação entre q e q_{CLASH} (valores à escala de protótipo).

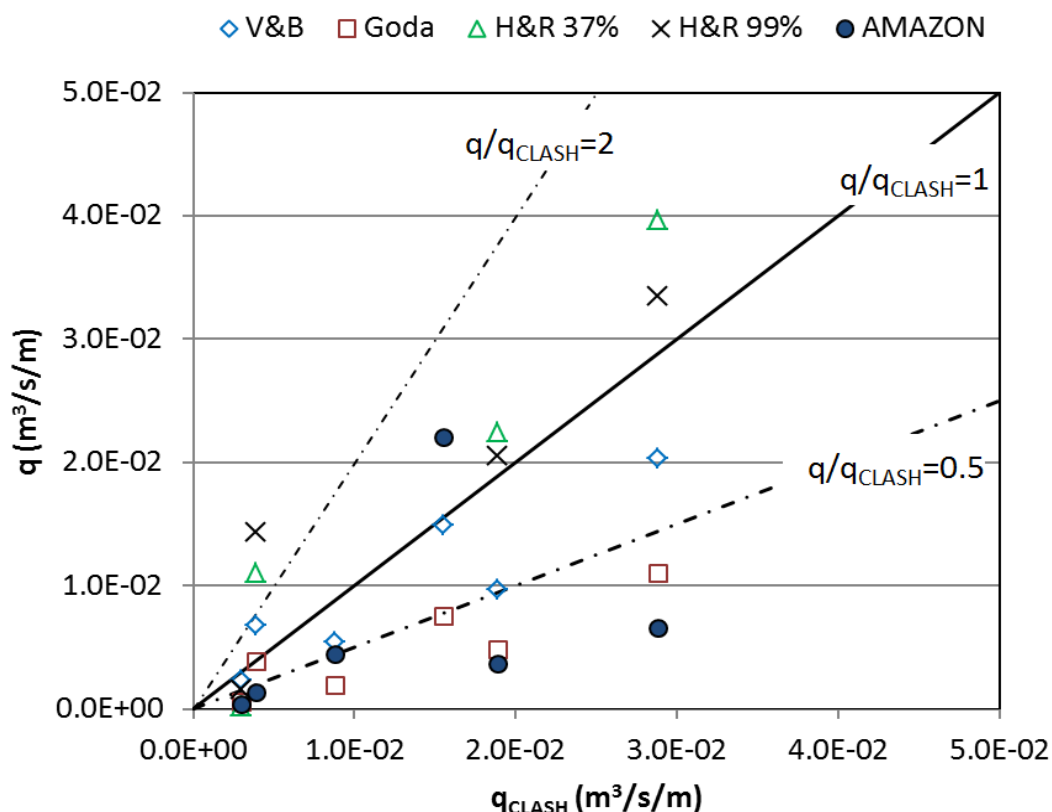


Figura 6 – Relação entre q e q_{CLASH} para $q < 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{/s/m}$ (valores à escala de protótipo).

4. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste trabalho estuda-se o galgamento em estruturas marítimas verticais impermeáveis através da aplicação do modelo numérico AMAZON (Hu, 2000; Reis *et al.*, 2011), que é um modelo bidimensional, baseado na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas. Para validar a sua aplicação, os resultados de caudal médio galgado obtidos com o modelo foram comparados com os resultados de ensaios em modelo físico bidimensional realizados anteriormente e disponíveis na base de dados do projeto europeu CLASH (Van der Meer *et al.*, 2009). Os resultados foram ainda comparados com os das fórmulas empíricas / semi-empíricas de Van der Meer & Bruce (2014), Goda (2008) e de Hedges & Reis (Reis *et al.*, 2013).

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 dois parâmetros de entrada (profundidade mínima molhada e a profundidade mínima de fricção) e da dimensão do domínio de cálculo.

Os resultados da calibração 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, 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 deste trabalho, os resultados sugerem que não há vantagem na sua utilização face às formulações disponíveis, tendo também em conta o tempo computacional significativo exigido para executar o AMAZON com a dimensão da malha escolhida.

Futuramente seria útil 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 da base de dados CLASH.

5. Referências

- Gaspar, J.J.J. (2016). Estudo do Galgamento em Estruturas Marítimas Verticais Utilizando o Modelo Numérico AMAZON. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL), Lisboa, Portugal.
- 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, UK.
- 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, London, UK.
- 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.
- 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).
- 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), UK, Expertise Netwerk Waterkeren (ENW), The Netherlands, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), Germany.
- Reis, M.T.; Hedges, T.S.; Neves, S.; Neves, M.G.; Hu, K.; Mase, H. (2013). Extending the H&R Wave Overtopping Model to Vertical Structures. Proc. SCACR 2013, 4-7 June, LNEC, Lisbon.
- 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 n vertical breakwaters. Proc. SCACR2015, September 28 – October 1, Florence, Italy.
- 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.
- Shiach, J.B. (2008). Numerical Modelling of Wave Run-up and Overtopping using Depth Integrated Equations. PhD Thesis, 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.
- 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. PhD Thesis, Universiteit Gent, Gent, Belgium.