

## AVALIAÇÃO DE VOLUMES INDIVIDUAIS GALGADOS NA ERICEIRA COM O MODELO NUMÉRICO SWASH

João Alfredo Santos<sup>1,2(\*)</sup>, Conceição Juana Fortes<sup>3</sup>, João Lopes Gomes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa - Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>CENTEC – Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica, Instituto Superior Técnico - Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa, Portugal

(\*)Email: jasantos@dec.isel.ipl.pt

### RESUMO

Neste trabalho, utilizou-se o modelo numérico SWASH para avaliar os volumes galgados em ondas individuais no quebra-mar da Ericeira. Começa-se por definir o valor do coeficiente de Manning a utilizar no talude do quebra-mar, para simular perda de energia provocada pela rugosidade e pela percolação no processo do galgamento, comparando o volume galgado previsto pelo modelo numérico com os valores medidos nos ensaios com modelo físico realizados no LNEC, para um dado estado de agitação. Depois, para ondas seleccionadas do mesmo estado de agitação verifica-se se o modelo numérico fornece valores semelhantes aos do mesmo modelo físico.

**Palavras-chave:** galgamento, quebra-mar de taludes, modelo reduzido, modelo numérico.

### INTRODUÇÃO

O galgamento de proteções marginais e de quebra-mares é um fenómeno que pode ter consequências importantes para a segurança intrínseca destas estruturas, para a segurança de bens imóveis e de equipamentos que deveriam estar protegidos por aquelas estruturas, bem como para a segurança de pessoas e veículos que se deslocam na proximidade das mesmas estruturas. Este fenómeno é caracterizado pelo caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura durante um temporal.

O modelo numérico SWASH (Zijlema and Stelling, 2005, 2008) é um modelo não hidrostático para propagação de ondas capaz de resolver as equações não lineares para ondas em águas pouco profundas e é capaz de estimar não só o caudal galgado em ondas individuais bem como a extensão da zona inundada. Suzuki *et al.* (2017) utilizaram este modelo para simular galgamentos em quebra-mares impermeáveis e de taludes lisos. Para lidar com quebra-mares de taludes com um manto de Accropode, Zhang *et al.* (2020) propõe a utilização no modelo SWASH de um coeficiente de Manning fictício para representar a perda de energia do escoamento causada pela rugosidade e pela percolação no processo do galgamento.

Manz (2022) propõe 5 expressões para o coeficiente de Manning consoante se trate de um talude com blocos de tetrápodos e 4 diferentes ângulos de incidência da onda ou cubos de Antifer e considerando um ataque frontal da onda. Estas expressões foram testadas em duas secções do quebra-mar da Ericeira, em 2 perfis (um com tetrápodos e outro com cubos de Antifer) e comparados com os resultados da rede neuronal NN\_OVERTOPPING2. Os resultados do SWASH são inferiores aos estimados pela rede neuronal, mas de uma forma geral, o modelo SWASH é capaz de fornecer bons resultados desde que seja calculado o coeficiente de Manning através das expressões atrás referidas.

Neste trabalho pretende-se averiguar se a metodologia de Zhang *et al.* (2020) também produz bons resultados para quebra-mares com um manto de tetrápodos, como o que protege o porto da Ericeira. Compara-se as previsões do SWASH com as medições dos ensaios em modelo físico de um trecho daquele quebra-mar realizados no canal de ondas irregulares do LNEC (Santos *et al.* 2021). O objetivo último é avaliar o volume galgado em ondas individuais de um estado de agitação.

## MODELO SWASH

### Aspetos gerais

O modelo SWASH (*Simulating Waves till Shore*) foi desenvolvido pela Delft University of Technology, com base no trabalho de Stelling e Zijlema (2003), Stelling e Duinmeijer (2003) e Zijlema e Stelling (2005, 2008), e simula numericamente escoamentos de superfície livre não hidrostáticos e com viscosidade em uma ou duas dimensões horizontais. Como as equações base são as equações não lineares de águas pouco profundas e incluem a pressão não hidrostática, o modelo descreve os escoamentos complexos e rapidamente variáveis em zonas costeiras onde ocorrem fenómenos de galgamento e inundação. O modelo é capaz de simular a propagação de ondas em águas pouco profundas incluindo processos costeiros, como a rebentação, espraiamento, transmissão de onda através de estruturas, interação não linear e circulação devida à onda (Zijlema *et al.*, 2011).

O modelo SWASH baseia-se nas equações não lineares de águas pouco profundas (Nonlinear Shallow Water – NLSW). Trata-se de uma aproximação às equações do movimento de fluidos incompressíveis com a decomposição de Reynolds para os campos das variáveis cinemáticas e aplicação do operador média temporal (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS). A aproximação, apropriada para escoamentos com superfície livre, desenvolve-se através de uma integração na vertical ao longo da coluna líquida, dos diferentes termos das equações, ponderada pela profundidade total desta última (Trigo-Teixeira, 1994).

Esta operação aplica-se às componentes horizontais da equação de balanço da quantidade de movimento e à equação de conservação de massa com condições de fronteira no fundo e na superfície livre. A componente vertical é aproximada pelo equilíbrio hidrostático, o que permite introduzir a elevação da superfície livre nas componentes horizontais do gradiente da pressão. A restrição para o equilíbrio na vertical, que exclui acelerações verticais, é equivalente à aproximação de ondas longas. Nesta configuração, as velocidades verticais são estimadas através da equação da continuidade. Os modelos puramente hidrostáticos são utilizados em maiores escalas espaciais, como a propagação da onda de maré.

Para alargar o âmbito de aplicação do SWASH para menores escalas espaciais, em particular a propagação da agitação marítima em aplicações de pequena escala costeira, é necessário modificar as condições de balanço da componente vertical quantidade de movimento. No caso, levantar o constrangimento imposto pela igualdade entre o gradiente vertical da pressão e a força da gravidade. O primeiro passo é decompor a pressão total na soma de duas componentes, uma de carácter hidrostática ( $p_h$ ) e outra não hidrostática ( $q$ )

$$p = p_h + q, \quad (1)$$

Verificando-se:

$$p_h = \rho g (\eta - z). \quad (2)$$

#### Commented [JS1]:

The SWASH model (an acronym for Simulating Waves till Shore) was developed by the Delft University of Technology, based on the work of Stelling and Zijlema (2003), Stelling and Duinmeijer (2003) and Zijlema and Stelling (2005, 2008), and numerically simulates non-hydrostatic, free-surface, rotational flows in one or two horizontal dimensions. As the governing equations are nonlinear shallow water (NLSW) equations and include non-hydrostatic pressure, they can describe complex and rapidly changing flows in detailed topo-bathymetries that are often found in coastal flooding events. Therefore, the model is able to simulate shallow water flows and nearshore processes, including wave propagation, breaking and runup, wave transmission through structures, non-linear interaction and wave-induced circulation (Zijlema *et al.*, 2011).

A dedução das equações de base do modelo SWASH, na versão de uma camada, que é equivalente a um modelo integrado na vertical (2DH), é análoga à acima descrita. Apenas se faz uso de (1) e (2), o que faz intervir a elevação da superfície livre ( $\eta$ ) nas componentes horizontais do gradiente da pressão e a introdução de um novo termo. Este novo termo vai garantir o carácter não hidrostático do modelo e controlar as suas características de dispersão.

O resultado está apresentado no conjunto de equações seguintes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h} &= \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h} &= \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$\tau_{ij}$  representa o tensor das tensões tangenciais horizontais de origem turbulenta (com  $i, j = 1, 2$ ),  $c_f$  é o fator de resistência,  $h$  a profundidade total, resultante da soma da elevação da superfície livre  $\eta$  com a profundidade do nível de repouso  $d$ ,  $q$  é pressão não hidrostática normalizada por  $\rho$  e  $u$  e  $v$  as componentes horizontais do vetor velocidade integradas na vertical.

Zijlema *et al.* (2011), mostram quais as aproximações a adotar no cálculo do integral, ao longo da profundidade da coluna líquida, das componentes horizontais do gradiente da pressão não hidrostática ( $\Delta q/\Delta x$  e  $\Delta q/\Delta y$ ) que figuram em (2.3). Estas aproximações visam assegurar um melhor ajuste numérico à relação de dispersão (Anexo A). O fator de resistência relaciona-se com o coeficiente de Manning ( $n$ ) pela seguinte equação

$$C_f = \frac{n^2 g}{h^{1/3}} \quad (3.4)$$

O modelo de fecho da turbulência baseia-se na hipótese de Boussinesq e consequente introdução de uma viscosidade turbulenta ( $\nu_t$ ). Como tal, o tensor das tensões tangenciais horizontais de origem turbulenta tem a seguinte expressão

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.5)$$

O modelo SWASH opera também em versão multicamada. As equações apresentadas são aplicáveis camada a camada (o domínio não é integrado na vertical, mas sim discretizado). Esta funcionalidade é possível com uma equação de balanço da quantidade de movimento na vertical, que é integrada explicitamente. Uma das características mais marcantes e originais do SWASH reside no esquema numérico escolhido para a referida integração.

O modelo numérico SWASH é capaz de estimar não só o caudal galgado em ondas individuais bem como a extensão da zona inundada. Suzuki *et al.* (2017) utilizaram este modelo para simular galgamentos em quebra-mares impermeáveis e de taludes lisos. Para lidar com quebra-mares de taludes com um manto de Accropode, rugoso e permeável, Zhang *et al.* (2020) propõe a utilização no modelo SWASH de um coeficiente de atrito aparente para que o termo das tensões tangenciais no fundo calculado na equação da quantidade de movimento represente a perda de energia do escoamento causada pela rugosidade e pela percolação no processo do galgamento.



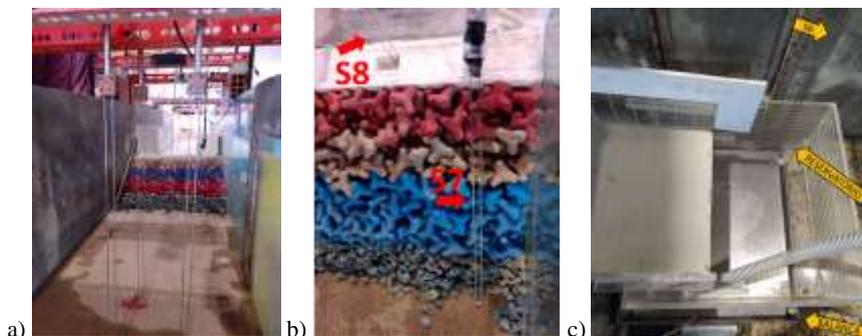


Figura 2. a) Sondas S3 a S5; c) Sonda de espraio; d) Sonda S6, descarregador e reservatório para galgamentos

### Condições de aplicação do modelo SWASH

Utilizou-se a versão bidimensional do SWASH na qual se reproduziu o perfil longitudinal do fundo e do trecho do quebra-mar estudado, incluindo o terrapleno atrás do coroamento da estrutura.



Figura 3. Domínio de cálculo do modelo SWASH

Utilizou-se a versão unidimensional do modelo SWASH com uma camada apenas, isto é integrado na vertical, e procurou-se reproduzir no modelo numérico a geometria do canal utilizado nos ensaios com modelo físico (Figura 3).

Na fronteira correspondente ao batedor impôs-se série temporal da elevação da superfície livre que era o objetivo do controlo do batedor no modelo físico. Na outra extremidade do canal impôs-se a condição de radiação de Sommerfeld, apenas para garantir que as perturbações saíam do domínio. Para lidar com o termo da pressão não hidrostática e aumentar a estabilidade numérica do modelo utilizou-se um esquema Keller-Box com um pré-condicionador ILU.

A discretização espacial foi de 1 cm e a temporal de 0,005 s. Toda a fronteira do modelo numérico foi considerada impermeável e em todo o fundo do modelo utilizou-se o valor de  $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  para o coeficiente de Manning, exceto no trecho correspondente ao manto protetor onde se foi alterando o valor deste coeficiente até o volume galgado medido no vértice do terrapleno estar próximo do observado no modelo físico. As séries temporais dos resultados obtidos têm um intervalo de 0,01 s e as simulações foram realizadas com uma duração correspondente a 1000 ondas.

Simulou-se um estado de agitação correspondente a um espectro empírico de JONSWAP com  $HS=0,16 \text{ m}$ ,  $TP=1,70 \text{ s}$  e  $\gamma=3,3$ . A profundidade junto ao batedor era 0,58 m, a que correspondia uma profundidade no pé do talude de 0,13 m. Escolheu-se um caso de teste em que o volume total de água galgado no ensaio com modelo físico não ultrapassou a capacidade de

armazenamento do reservatório existente no interior do canal. Pretendia-se assim evitar incertezas nos volumes dos galgamentos individuais ocorridos durante esse ensaio.

## RESULTADOS

Na ?? apresenta-se a série temporal do volume galgado acumulado no reservatório. No final deste ensaio estavam no interior do reservatório 14 litros de água que tinha galgado o coroamento do modelo. Como a série temporal medida nos ensaios tinha algumas oscilações foi decidido utilizar um filtro de média móvel com 5 pontos.

Na Figura 4 mostra-se o caudal por metro linear do coroamento em cada galgamento individual sendo clara a diferença entre utilizar o volume medido e o volume filtrado. Uma vez que a largura do coroamento do modelo físico era 0,80 m o integral dos caudais deste gráfico deve ser cerca de 17,5 l/m. Com base nos valores do caudal estimado a partir dos valores medidos o integral obtido foi de 18,1 l/m, enquanto para o caudal estimado a partir dos valores filtrados o integral foi de 17,7 l/m. Assim, nas comparações com os resultados do modelo SWASH vai utilizar-se o caudal galgado correspondente a este volume filtrado.

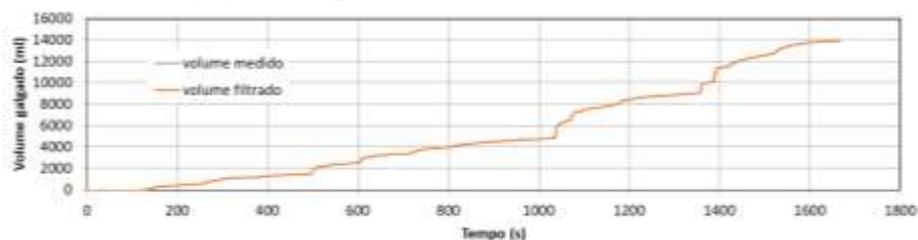


Figura 4. Volume acumulado no ensaio com HS=0,16 m, TP =1,70 s e d=0,13 m

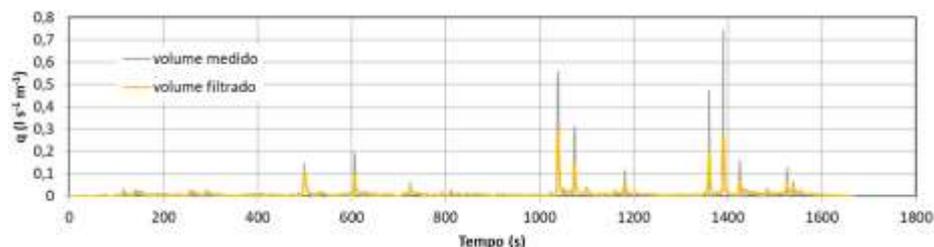


Figura 5. Caudal por metro de coroamento em galgamentos individuais no ensaio com HS=0,16 m, TP =1,70 s e d=0,13 m

No ajuste do coeficiente de Manning do talude exposto do quebra-mar, procurou-se que o volume total galgado medido no modelo numérico se aproximasse do valor medido no ensaio com o modelo físico. Para facilitar a operação do modelo numérico consideraram-se múltiplos do coeficiente da rugosidade de Manning no resto do domínio ( $n = 0,012 m^{-1/3} s$ ) como pode ver-se no Quadro 1. No mesmo quadro pode verificar-se, como esperado, que o aumento da rugosidade do manto implica um decréscimo do volume galgado. Quando aquele coeficiente no trecho do manto é 5 vezes o valor no resto do domínio, isto é,  $n = 0,060 m^{-1/3} s$ , o volume

galgado em 0,80 m de largura de canal é 15,8 l, o que é bastante próximo dos 14 litros observados no modelo físico.

Quadro 1. Evolução do volume galgado com o coeficiente de Manning do talude, quando a condição de fronteira no batedor é uma série temporal de elevação da superfície livre com HS = 0,16 m, TP = 1,70 s

$n/0,012 m^{-1/3} s$ (-)	$n (m^{-1/3} s)$	Vol (l)
0,10		
0,50		
0,75		
1,00		
2,00		
3,00		
4,00		
5,00		
5,01		
5,05		
5,11		
5,50		
6,17		
6,95		
7,50		

Obtida a concordância no volume galgado olhou-se para os caudais dos galgamentos individuais previstos pelo modelo numérico. Como a discretização temporal nos resultados do modelo numérico (0,01 s) era muito mais fina que a utilizada na medição dos volumes galgados (1 s) integrou-se aqueles resultados para intervalos de 1 s. A Figura 5, apresenta as séries temporais do caudal galgado previsto pelo modelo numérico na situação de melhor concordância do volume galgado (pad\_f\_5.0) e a do caudal galgado medido no modelo físico. A figura mostra que a duração dos episódios de galgamento é claramente maior no modelo físico que no modelo numérico. Isso leva a valores maiores do caudal galgado no modelo numérico do que os observados no modelo físico.

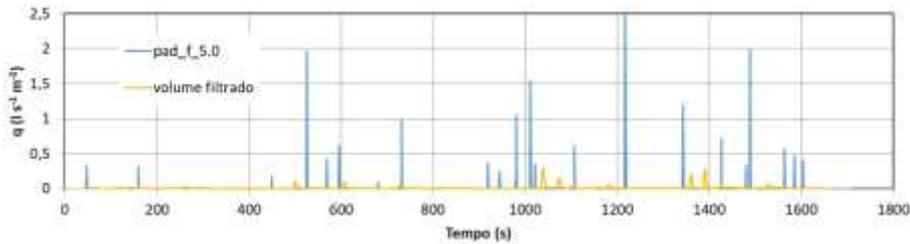


Figura 6. Séries temporais do caudal galgado medido no modelo físico e previsto no modelo numérico para o ensaio com HS = 0,16 m, TP = 1,70 s e d = 0,13 m

Mais preocupante nesta comparação foi verificar quando se expande o gráfico da anterior para fornecer mais detalhes no intervalo de  $t = 1300$  s a  $t = 1500$  s, Figura 6, que a duração aparente dos episódios de galgamento medidos é superior ao período de pico do estado de agitação incidente no modelo, algo cuja verosimilhança é questionável. Esta duração maior pode dever-se à metodologia utilizada para identificar aqueles episódios a partir da série (filtrada ou não) dos volumes galgados ou até ao escoamento do caudal galgado sobre o descarregador que liga a aresta da superestrutura ao reservatório onde o volume galgado era recolhido.

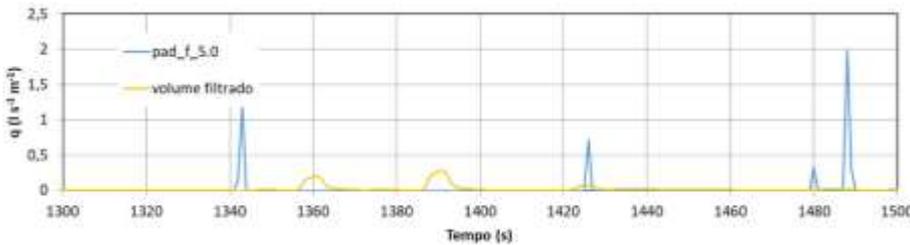


Figura 7. Ampliação do gráfico da Figura 5 para o intervalo entre  $t = 1300$  s e  $t = 1500$  s.

Na simulação da resposta em termos de galgamento do quebra-mar da Ericeira o que vai estar disponível é a caracterização espectral da agitação marítima na fronteira do domínio. Assim, antes de se proceder à implementação do modelo SWASH no pacote numérico a instalar na Ericeira, averiguou-se se os resultados obtidos continuavam a ser os mesmos quando, em vez da série temporal da elevação da superfície livre na fronteira correspondente ao batedor, o que está disponível é um espectro a partir do qual é gerada no modelo numérico a série temporal da elevação da superfície livre utilizada como condição de fronteira do modelo.

Neste teste utilizou-se o mesmo espectro que foi o objetivo dos ensaios realizados no modelo físico, isto é um espectro JONSWAP com HS = 0,16 m, TP = 1,70 s e  $\gamma = 3,3$ . O Quadro 2 mostra o volume galgado obtido com o modelo numérico para diversos valores do coeficiente de Manning com esta nova condição de fronteira, isto é definida internamente pelo modelo numérico a partir de uma caracterização espectral.

Quadro 2. Evolução do volume galgado com o coeficiente de Manning do talude quando a condição de fronteira no batedor é caracterizada por um espectro JONSWAP com HS = 0,16 m, TP = 1,70 s e  $\gamma = 3,3$ .

$n/0,012 m^{-1/3} s$	$n (m^{-1/3} s)$	Vol (l)
(-)		

2,00		
3,00		
3,30		
3,40		
3,50		
3,52		
3,60		
4,00		
4,50		
5,00		
5,50		

A gama de coeficientes de Manning não coincide com a do Quadro 1 porque quando se utilizou o valor de  $n=0,06 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  no modelo numérico não se obteve um volume galgado de 15 l como anteriormente mas sim apenas 2,5 l. Para piorar as coisas, quando se tentou obter um valor do volume galgado mais próximo dos 14 l observados no modelo físico, utilizando valores de  $n / 0,012 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}^{-1}$  entre 3,00 e 3,50 verificou-se que a evolução do volume galgado com o coeficiente de Manning deixou de ser monotónica. Para evitar mais corridas do modelo numérico SWASH, decidiu-se escolher para esta situação  $n = 0,0420$ , isto é  $n = 3,5 * 0,012 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ .

Um último exercício consistiu em averiguar a influência no volume galgado da semente utilizada na geração das fases aleatórias de cada uma das componentes consideradas na síntese da serie temporal da fronteira do domínio. Como o valor por omissão dessa semente no SWASH é o número 12345678, consideraram-se os valores indicados no Quadro 3. (diapositivo 15)

Embora se observe uma variação no volume galgado, pode afirmar-se que a ordem de grandeza das estimativas é a mesma. O maior volume galgado (10,3 l) é obtido para a semente 2 e o menor (3,9 l) para o semente 1.

Parei aqui. Falta melhorar os dois parágrafos acima.

Texto que vinha do resumo

A variação do volume galgado com o valor do coeficiente de Manning para o talude exposto do quebra-mar não foi monotónica. Embora se observasse um decréscimo do volume galgado de 50,00 l, quando  $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ , para 8,14 l, quando  $n = 0,041 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ , o ligeiro aumento do coeficiente de Manning para  $n = 0,042 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  fez subir o volume de água galgado para 10,47 l, ficando muito próximo do valor observado neste ensaio em modelo físico (13,83 l). Este passou então a ser o valor considerado adequado para o coeficiente de Manning.

Na Figura 1 apresenta-se as séries temporais do caudal galgado medido no ensaio com modelo físico (Balança) e no modelo numérico (no\_seed). Como o primeiro caudal foi estimado a partir de medições do peso da água galgada a cada segundo, para se obter valores comparáveis do caudal do modelo numérico, calculou-se o volume galgado em cada intervalo de 1 s. Mesmo assim, é evidente na figura que a duração dos galgamentos no modelo numérico é substancialmente inferior à dos galgamentos no modelo físico. Tal pode dever-se ao escoamento da água galgada no descarregador que liga ao reservatório colocado sobre a balança.

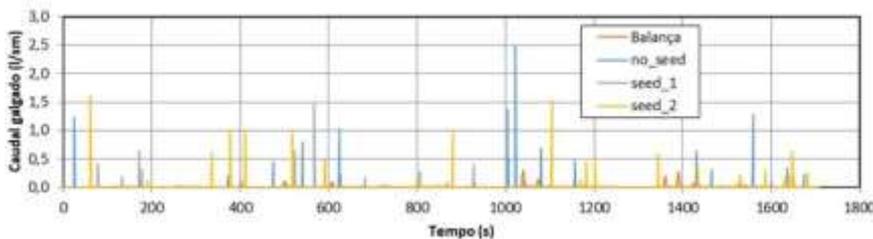


Fig. 1 - Séries temporais dos caudais galgados no ensaio com modelo físico e no modelo.

## FALTA AQUI ALGUNS RESULTADOS

### CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o parâmetro utilizado na geração das fases aleatórias de cada um dos períodos das ondas que compunham elevação da superfície livre na fronteira de entrada do domínio influencia as séries dos caudais galgados, embora os valores máximos obtidos não sejam muito diferentes. Em todo o caso, importa referir que o modelo SWASH mostrou-se capaz de prever a ordem de grandeza do volume total galgado no ensaio com modelo físico. Na comunicação final, apresentar-se-á também a comparação dos resultados do modelo e dos ensaios, em termos de galgamentos individuais.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal, aos projetos To-SEAlert (PTDC/EAM-OCE/31325/2017) e Bsafe4Sea (???) .

### REFERÊNCIAS

Santos, J.A., Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Pinheiro, L., Pinto, M., Sanches, C., Gueifão, J., Zózimo, A.C., Modelação física da resposta à agitação incidente de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira. Revista Recursos Hídricos, 42:1, 91-100, 2021.

Suzuki, T., Altomare, C., Veale, W., Verwaest, T., Trouw, K., Troch, P., Zijlema, M., Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH. Coastal Engineering, 122, p. 108–123, 2017.

Zhang, N., Zhang, Q., Wang, K.-H., Zou, G., Jiang, X., Numerical simulation of wave overtopping on breakwater with an armor layer of accropode using SWASH model. *Water*, 12:2, 2020.