



## EFEITO DA VEGETAÇÃO NO ESPRAIAMENTO E GALGAMENTO: EXPERIÊNCIAS NUMÉRICAS COM O MODELO SWASH

Diogo Mendes; Diogo Fonseca; Leticia Weber; Piet Haerens

HAEDES, Casais do Arrocho, 2025-452 Azóia de Cima, Portugal  
HAEDES, Casais do Arrocho, 2025-452 Azóia de Cima, Portugal  
HAEDES, Kortewagenstraat 53B, 9230 Wetteren-ten-Ede, Belgium  
HAEDES, Kortewagenstraat 53B, 9230 Wetteren-ten-Ede, Belgium

[diogo.mendes@haedes.eu](mailto:diogo.mendes@haedes.eu), [diogo.fonseca@haedes.eu](mailto:diogo.fonseca@haedes.eu); [leticia.weber@haedes.eu](mailto:leticia.weber@haedes.eu);  
[piet.haerens@haedes.eu](mailto:piet.haerens@haedes.eu)

### Resumo

Dado o recente interesse na incorporação de soluções baseadas na natureza em obras de engenharia costeira, a utilização de vegetação poderá constituir uma solução eficaz no processo de atenuação da agitação marítima incidente, com a vantagem de apresentar mais-valias ambientais. A incerteza associada ao efeito da vegetação no espraio e no galgamento sobre obras de defesa costeira constituiu a motivação deste trabalho. Primeiro, comparou-se o espraio simulado pelo modelo numérico SWASH com ensaios em laboratório realizados com e sem vegetação. Segundo, realizaram-se experiências numéricas com o SWASH para analisar o efeito da vegetação no galgamento em dois perfis de praia. Por último, foi efetuada uma análise de sensibilidade através da colocação de vegetação, ao largo da profundidade de fecho, com um comprimento entre 25 m e 200 m. Os resultados obtidos indicam que o caudal galgado é reduzido em mais de 15% para as situações em que o comprimento da vegetação é superior a 100 m, independentemente do volume da praia emersa.

### Introdução

Apesar de ocupar apenas 0,2% da superfície do oceano, a vegetação marinha tem uma contribuição de 50% para o aprisionamento de dióxido de carbono (Duarte *et al.*, 2013). Esta vegetação contempla as pradarias marinhas (*seaweed/seagrass*), os sapais (*salt marshes*), os mangais (*mangroves*) e as algas (*algae*). Dada a mais-valia ambiental da vegetação marinha, é de esperar que esta tome cada vez mais relevância na incorporação em obras de engenharia.

No domínio da engenharia costeira, existe, atualmente, um grande interesse na utilização de vegetação marinha para fornecer Soluções Baseadas na Natureza (*Nature-Based Solutions - NBS*) (Narayan *et al.*, 2016). No entanto, o estudo de NBS não é recente. A título de exemplo, o efeito da solução isolada de *seaweed* na evolução morfodinâmica de praias arenosas foi analisado na década de 60 (Price *et al.*, 1968). Em vez da sua utilização isolada, a vegetação marinha pode ser usada como complemento a estruturas de defesa costeira. Desta forma, a agitação marítima incidente pode ser atenuada devido ao efeito da vegetação (Kobayashi *et al.*, 1993). Apesar da atenuação promovida por NBS, o efeito que estas têm na redução do espraio e do caudal galgado em estruturas de defesa costeira permanece pouco quantificado (Vuik *et al.*, 2016).

A modelação numérica constitui uma ferramenta capaz de analisar o efeito da atenuação da agitação marítima incidente devido a NBS. De forma geral, o efeito da vegetação marinha é tido em conta nos modelos numéricos através da incorporação de um termo na equação de conservação da quantidade de movimento. Este termo tem uma formulação baseada na fórmula de Morison. O SWASH é um dos modelos numéricos, normalmente aplicado em zonas costeiras, capaz de ter em conta o efeito da vegetação (Zijlema *et al.*, 2011). A aplicação do SWASH a vários casos de estudo com vegetação permitiu ilustrar o seu potencial de utilização em casos práticos (Suzuki *et al.*, 2019). Mais recentemente, Reis *et al.* (2020) aplicou o modelo numérico SWASH a dois casos de estudo com vegetação. Em ambos os casos, o modelo SWASH foi capaz de reproduzir a redução da altura significativa da agitação marítima que ocorreu durante a propagação através da vegetação. Estas comparações e verificações do modelo SWASH

permitem concluir que este modelo numérico é capaz de simular o efeito da vegetação na atenuação da amplitude de onda.

Os ensaios em laboratório permitem analisar de forma detalhada o efeito da vegetação na propagação da agitação marítima em condições controladas. Resumidamente, estes ensaios permitiram concluir que vegetação promove o decaimento da amplitude de onda incidente (Kobayashi *et al.*, 1993; Agustin *et al.*, 2009). A maioria dos ensaios em laboratório utilizaram vegetação artificial. Neste caso, o efeito da vegetação é reproduzido através da colocação de cilindros de madeira rígidos, o que não representa completamente a realidade uma vez que a vegetação é flexível. Ozeren *et al.* (2014) verificaram que a utilização de vegetação real não altera as conclusões anteriores. Ou seja, a utilização de vegetação promove a redução da amplitude de onda, apesar de algumas diferenças em relação ao coeficiente de arrastamento entre vegetação real e artificial.

Uma das limitações dos ensaios em laboratório e aplicações de modelos numéricos é que se restringem à análise da propagação da agitação marítima através da vegetação. Ou seja, não abordam o efeito da vegetação na cota de espraiamento ou no caudal galgado sobre estruturas de defesa costeira.

Mais recentemente, Keimer *et al.* (2021) analisaram o efeito da vegetação no espraiamento ao longo de um talude de 1:6 (V:H) através de ensaios em laboratório efetuados com condições de onda regulares e irregulares (Figura 1). Os autores concluíram que a colocação de um campo de vegetação submerso antes do talude (domínio a verde na Figura 1) reduz a cota de espraiamento em até 16,5%.

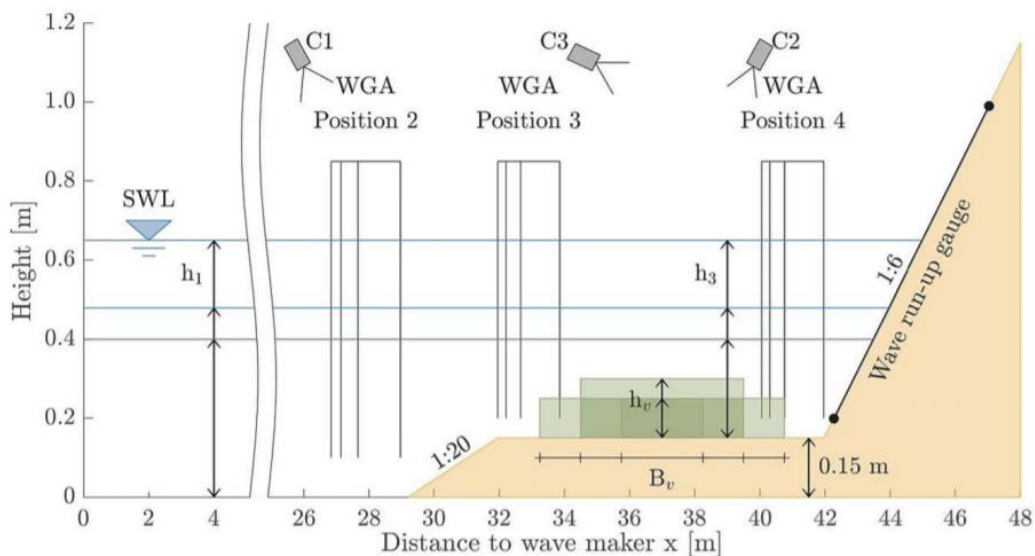


Figura 1. Perfil dos ensaios em laboratório (adaptado de Keimer *et al.*, 2021).

Com base nesta breve introdução, o presente estudo apresenta dois principais objetivos. O primeiro, é o de verificar a capacidade do modelo SWASH em reproduzir a cota de espraiamento com base nos ensaios em laboratório de Keimer *et al.* (2021). O segundo, é o de realizar experiências numéricas num talude truncado para obter uma prova de conceito do efeito da vegetação no galgamento costeiro. Esta última análise utiliza a Praia da Vagueira (Vagos, Aveiro) como caso de estudo, e pretende contribuir para um melhor conhecimento do efeito de NBS no domínio da engenharia costeira.



## Modelo numérico SWASH

### Introdução e aplicações

O modelo numérico *Simulating WAVes till SHore* (SWASH) reproduz os processos físicos mais relevantes associados a ondas geradas pelo vento, ondas de superfície dispersivas, que ocorrem entre a profundidade de fecho e o limite do espraiamento (Zijlema *et al.*, 2011). Nomeadamente, este modelo reproduz o emolamento, a refração, a difração e a reflexão da onda. Como o SWASH é um modelo que resolve a fase da onda, este modelo pode ser utilizado para estudar interações não-lineares entre ondas em fundos complexos, como o caso de perfis do tipo barra-fossa (Mendes *et al.*, 2018).

O SWASH é comparável com os modelos que resolvem as equações de Boussinesq, porque estes também resolvem a fase da onda. No entanto, em vez da utilização de derivadas parciais de ordem mais elevada, o SWASH utiliza várias camadas para a discretização vertical. Esta diferença permite melhores tempos computacionais e uma maior estabilidade numérica (Zijlema *et al.*, 2011).

O SWASH pode ser configurado para simulações 3D, 2DV, 2DH e 1D. No presente estudo, o modelo SWASH foi aplicado em 2DV, ou seja, ao longo de um perfil transversal com duas camadas na vertical. Na zona de rebentação, o algoritmo do SWASH, denominado por *Hydrostatic Front Approximation* (HFA), permite ter em conta de forma precisa a dissipação de energia associada à rebentação induzida pelo fundo (Smit *et al.*, 2013). De notar que o SWASH não permite simular toda a complexidade do fenómeno de rebentação induzida pelo fundo, como por exemplo o *overtopping*, em que a crista da onda incide na cava como um jato que promove emulsão de ar (Neves, 2019).

Das várias aplicações do SWASH em estudos de engenharia costeira, destaca-se a capacidade em simular o caudal médio de galgamento sobre estruturas de defesa costeira no caso de geometrias simplificadas (Suzuki *et al.*, 2017), e a sua aplicação mais recente em situações mais complexas para simular a altura e velocidade do escoamento sobre estruturas de defesa costeira durante fenómenos de galgamento (Suzuki *et al.*, 2020).

### Equações de conservação

O SWASH utiliza as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, que, ao longo de um perfil transversal (2DV), se traduzem nas seguintes equações:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{nh}}{\partial x} + d_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + d_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{nh}}{\partial z} + d_h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + d_v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - g - \frac{1}{\rho} F_z \quad (3)$$

onde  $u$  e  $w$  são as velocidades do escoamento ao longo do eixo  $x$  e  $z$ , respetivamente,  $p_{nh}$  é a pressão não-hidrostática,  $d_h$  e  $d_v$  são as viscosidades turbulentas horizontais e verticais, respetivamente,  $\tau_b$  é a tensão de atrito no fundo ao longo do eixo  $x$ , e  $F_x$  e  $F_z$  são o conjunto de forças aplicadas ao longo do eixo  $x$  e  $z$ , neste caso associadas ao efeito da vegetação.  $\tau_b$  é obtida através de uma formulação quadrática que utiliza o coeficiente de Manning e a velocidade do escoamento integrada ao longo da vertical.

A elevação da superfície livre ( $\eta$ ), associada às ondas de superfície dispersivas, é obtida através da integração vertical de (1) utilizando as condições de fronteira relevantes

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u \, dz = 0 \quad (4)$$

Em relação aos métodos numéricos, o método de diferenças finitas é utilizado para a discretização das equações (1)-(4) no espaço. O avanço no tempo é feito, normalmente, através



de um método explícito, o que torna o modelo numericamente estável quando o número de Courant é inferior a 1.

#### Efeito da vegetação

O efeito da vegetação é tido em conta no SWASH através da equação de Morison (Suzuki *et al.*, 2019)

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D h_v b_v N_v u |u| + \rho (1 + C_m) h_v A_v N_v \frac{du}{dt} \quad (5)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arrastamento associado à vegetação,  $h_v$  é a altura da planta,  $b_v$  é o diâmetro de cada planta,  $N_v$  é o número de plantas por  $m^2$ ,  $C_m$  é um coeficiente e  $A_v$  é a área de cada planta. De notar que se utilizou a terminologia planta em vez de vegetação porque o efeito da vegetação é incorporado através da analogia a um cilindro rígido (ou planta). A força aplicada ao longo do eixo  $z$  é

$$F_z = \frac{1}{2} \rho C_D h_v b_v N_v w |w| \quad (6)$$

(5) e (6) permitem simular o efeito da vegetação no SWASH com base na analogia a um cilindro rígido. Ou seja, o efeito da deformação da vegetação na hidrodinâmica resultante não é tido em conta. Em aplicações de engenharia costeira, uma das dificuldades é a determinação dos valores de  $C_D$  e de  $C_m$  em (5) e (6), já que os outros parâmetros dependem das características geométricas da vegetação. Suzuki *et al.* (2019) utilizaram valores de  $C_m = 1,00$  e  $C_D$  entre 0,50 e 1,70. Reis *et al.* (2020) utilizaram valores de  $C_D$  entre 0,15 e 0,20. Pode assumir-se, então, que os valores de  $C_D$  variam entre 0,15 e 1,70.

#### Aplicação do modelo numérico SWASH aos ensaios em laboratório de Keimer *et al.* (2021)

##### Configuração do modelo SWASH

Os ensaios em laboratório de Keimer *et al.* (2021) realizados com ondas irregulares contemplaram três condições de agitação marítima e duas geometrias de vegetação (Tabela 1). No total, foram efetuados nove ensaios (A-CV2, ver Tabela 1). O nível de água em repouso no início dos ensaios foi de +0,027 m e a escala do modelo físico é de 1/10.

Tabela 1. Parâmetros e características dos ensaios em laboratório com ondas irregulares realizados por Keimer *et al.* (2021).  $s_0$  é a declividade da onda ao largo e  $\xi_0$  é o número de Iribaren.

Ensaio	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$s_0$	$\xi_0$	$B_v$ (m)	$h_v$ (m)	$n_v$ (m <sup>-2</sup> )
A	0,122	1,5	0,038	0,9	-	-	-
B	0,140	3,0	0,010	1,7	-	-	-
C	0,141	5,0	0,003	3,0	-	-	-
AV1	0,122	1,5	0,038	0,9	2,5	0,10	400
AV2	0,113	1,5	0,035	0,9	7,5	0,10	400
BV1	0,139	3,0	0,009	1,8	2,5	0,10	400
BV2	0,131	3,0	0,009	1,8	7,5	0,10	400
CV1	0,141	5,0	0,003	3,0	2,5	0,10	400
CV2	0,133	5,0	0,003	3,0	7,5	0,10	400



Os dados de entrada para especificação das condições de agitação marítima incidentes no SWASH são a altura significativa da agitação marítima ( $H_{m0}$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e o tipo de espectro. Neste estudo, utilizou-se um espectro do tipo JONSWAP com um fator  $\gamma$  de 3,3 (Keimer *et al.*, 2021).

As experiências numéricas preliminares, realizadas para o ensaio A, apresentaram discrepâncias consideráveis, em termos de valores de  $H_{m0}$  observados e simulados, quando se utilizou o valor de  $H_{m0}$  fornecido ao batedor especificado por Keimer *et al.* (2021). Devido a tais discrepâncias, definiu-se o valor de  $H_{m0}$  para especificação das condições de agitação marítima no SWASH igual ao valor obtido com base nas medições efetuadas na posição 2. Por consequência, a origem do domínio computacional foi definida, em direção ao batedor, a cerca de 4 m da posição 2 ( $X = 24$  m, ver Figura 1).

Um dos parâmetros analisados neste estudo foi a cota de espraio. Para esse cálculo, ajustou-se uma função de distribuição empírica cumulativa aos máximos locais da série temporal das cotas de espraio obtida diretamente do SWASH. A cota de espraio utilizada foi definida como aquela que tem uma probabilidade de excedência de 2% ao longo da série temporal ( $R_{2\%}$ ). Um procedimento semelhante foi feito por Keimer *et al.* (2021) para o valor de  $R_{2\%}$  nos dados obtidos em laboratório.

Adotou-se uma resolução espacial de 0,03 m após testes de sensibilidade à malha computacional e ao tempo de cálculo para o ensaio A. A profundidade mínima foi de 0,0005 m e o coeficiente de Manning teve um valor de 0,020  $m^{-1/3}s$ . Este último valor foi obtido após um ajuste efetuado para reduzir as diferenças entre o valor de  $R_{2\%}$  simulado e observado.

#### Comparação do modelo SWASH com os dados observados em laboratório

A comparação dos resultados do modelo SWASH com os dados observados foi feita para os ensaios A, B, AV2 e BV2. Os ensaios C, CV1 e CV2 não foram utilizados uma vez que a cota de espraio observada foi superior ao limite físico da sonda de espraio (Keimer *et al.*, 2021). Os ensaios AV1 e BV1 não foram utilizados uma vez que as diferenças da cota de espraio para uma vegetação com um comprimento de 2,5 m são pequenas (<0,5%). A comparação foi efetuada com base nos parâmetros  $H_{m0}$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $R_{2\%}$  (Figura 2 e Tabelas 2 e 3).

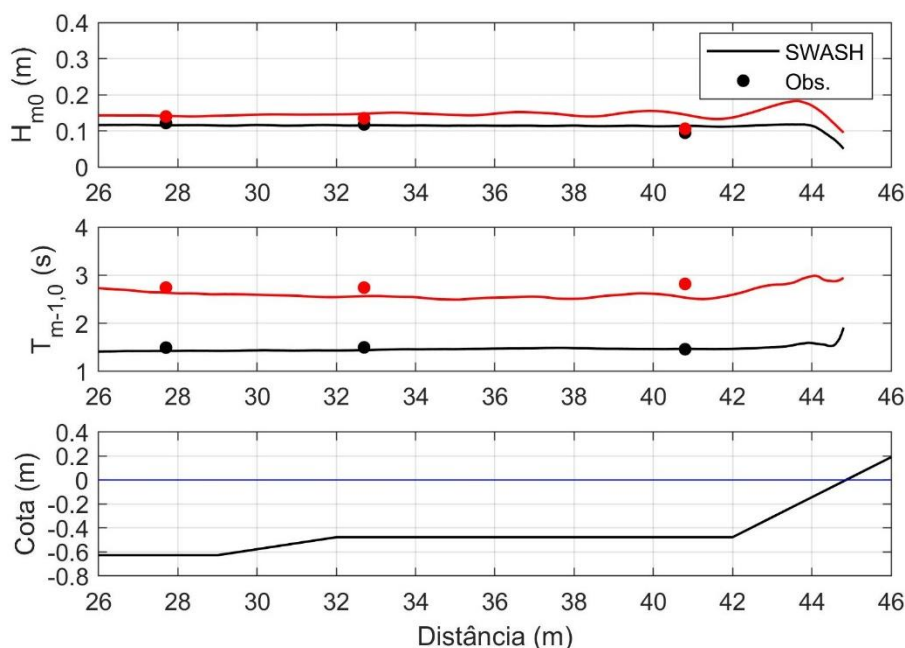


Figura 2. Comparação entre parâmetros observados (marcadores) e simulados (linhas) para o ensaio A (a preto) e ensaio B (a vermelho).



Verifica-se que os parâmetros  $H_{m0}$  e  $T_{m-1,0}$  são bem reproduzidos pelo SWASH para as posições  $X = 32,8$  m e  $X = 41,8$  m tanto para o ensaio A (linha a preto na Figura 2) como para o ensaio B (linha a vermelho na Figura 2). Ou seja, as diferenças entre os resultados simulados e os dados medidos são, geralmente, inferiores a 0,02 m para  $H_{m0}$  e inferiores a 0,2 s para  $T_{m-1,0}$ . De notar que não foram colocadas sondas na zona de rebentação  $X > 43,5$  m, pelo que não é possível verificar a capacidade do modelo SWASH em reproduzir a dissipação de energia por rebentação induzida pelo fundo ao longo dessa zona.

A Tabela 2 apresenta a comparação dos parâmetros  $\langle \eta \rangle$  (aumento do nível médio da água junto à costa devido à agitação marítima) e  $R_{2\%}$  para os ensaios sem vegetação. Verifica-se que o modelo SWASH subestima o valor de  $R_{2\%}$  em cerca de 36% para o ensaio A. Para o ensaio A, parte da subestimação de  $R_{2\%}$  pode ser explicada devido à subestimação do  $\langle \eta \rangle$ . O SWASH sobrestima em apenas 1% o valor de  $R_{2\%}$  para o ensaio B. Para o caso com vegetação, as diferenças entre o SWASH e os dados medidos foram semelhantes. Ou seja, o SWASH subestimou os valores de  $\langle \eta \rangle$  e  $R_{2\%}$  para o ensaio AV2 e reproduziu muito bem esses valores para o ensaio AB2. Esta comparação permite concluir que o SWASH consegue simular a cota de espraiamento com e sem vegetação, apresentando uma subestimação para uma declividade de onda mais elevada (Ensaio A, ver Tabela 1).

Tabela 2. Comparação entre parâmetros observados (obs.) e simulados (sim.) para os ensaios sem vegetação.

Ensaio	$\langle \eta \rangle$ obs. (m)	$\langle \eta \rangle$ sim. (m)	$R_{2\%}$ obs. (m)	$R_{2\%}$ sim. (m)
A	0.076	0.049	0.163	0.105
B	0.111	0.108	0.250	0.264

Tabela 3. Comparação entre parâmetros observados (obs.) e simulados (sim.) para os ensaios com vegetação.

Ensaio	$\langle \eta \rangle$ obs. (m)	$\langle \eta \rangle$ sim. (m)	$R_{2\%}$ obs. (m)	$R_{2\%}$ sim. (m)
AV2	0.075	0.046	0.162	0.099
BV2	0.108	0.098	0.246	0.245

## Experiências numéricas do efeito da vegetação no galgamento costeiro

### Caso de estudo da Praia da Vagueira (Vagos, Aveiro, Portugal)

Utilizou-se a Praia da Vagueira como caso de estudo para as experiências numéricas realizadas com o modelo SWASH. O perfil de praia contém uma barra submersa e uma berma na parte emersa (Figura 3). O edificado urbano da Vagueira está protegido por uma obra de defesa costeira através de uma defesa frontal aderente (Figura 1). A cota de coroamento e o declive do talude desta obra é de aproximadamente +11 m (ZH) e 2:3.5 (V:H), respetivamente.

Com base na análise de bóias oceânicas ao longo da costa continental portuguesa, Mendes e Oliveira (2021) indicam valores de  $H_{m0}$  que variam entre 3,45 m +/- 1.49 m em fevereiro até 1,62 m +/- 0,65 m em julho, para a bóia de Leixões. As tempestades podem ser caracterizadas como eventos em que  $H_{m0}$  ultrapassa 4,5 m durante pelo menos 6 h (Mendes e Oliveira, 2021). A declividade da agitação marítima, utilizando o período espectral  $T_{m02}$ , varia entre 0,020 e 0,060 durante eventos de tempestade (Mendes e Oliveira, 2021). Para o presente estudo, adotou-se na fronteira do domínio computacional um valor de  $H_{m0}$  de 5,0 m e um valor de  $T_p$  de 13 s, o que equivale a uma declividade ao largo de aproximadamente 0,030.

Apesar do modelo SWASH não simular o transporte sedimentar e a evolução morfodinâmica, os constituintes morfológicos da praia (barra submersa e berma de praia) podem influenciar a

determinação da cota de espraiamento e, conseqüentemente, do galgamento. Para ter em conta essa influência na discussão dos resultados, as experiências numéricas foram realizadas em dois perfis topo-batimétricos distintos. Estes perfis foram escolhidos com base no volume da praia emersa, determinado entre as cotas 2,0 m e 7,0 m ZH (Mendes *et al.*, 2021). Enquanto o perfil de 23/11/2020 tem um volume de praia, por unidade de largura, de 161 m<sup>3</sup>/m, o perfil de 22/03/2021 tem um volume de praia de 65 m<sup>3</sup>/m (Figura 3). Desta forma, os resultados obtidos contemplam duas condições morfológicas distintas.

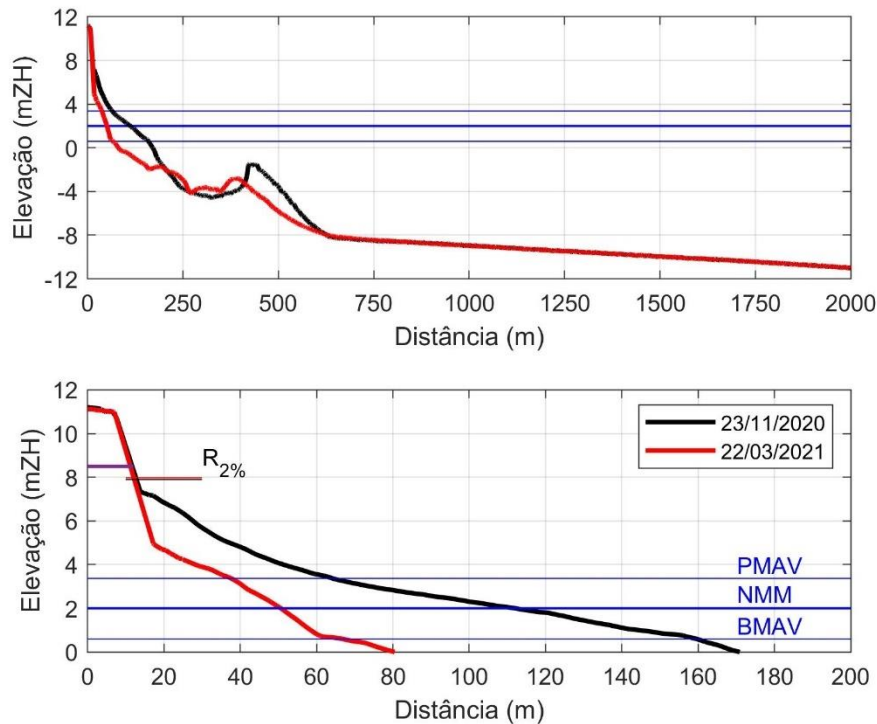


Figura 3. Perfis topo-batimétricos da Praia da Vagueira (linhas a preto e a vermelho) obtidos através do programa COSMO (<https://cosmo.apambiente.pt/>), níveis de maré da tabela de marés para o porto de Aveiro (linhas a azul), nível de  $R_{2\%}$  e cota de truncamento (linha a roxo).

Devido à elevada cota de coroamento da defesa aderente, o talude foi truncado a uma cota ligeiramente superior ao valor de  $R_{2\%}$  de simulações preliminares. O valor de  $R_{2\%}$  foi de 7,90 m e de 7,98 m (ZH) para o perfil de 23/11/2020 e o de 22/03/2021, respetivamente. O talude foi truncado à cota de 8,50 m (ZH) (Figura 3).

#### Configuração do modelo SWASH e cálculo do galgamento

O modelo SWASH foi configurado de forma semelhante à anterior aplicação aos dados obtidos em laboratório. Utilizaram-se duas camadas na vertical, a resolução da grelha computacional foi de 0,50 m e o valor do coeficiente de Manning foi de 0,020 m<sup>-1/3</sup>s.

O galgamento foi calculado com base nas séries temporais de profundidade (Figura 4d) e velocidade (Figura 4e), obtidas na crista da berma. Considerou-se um evento de galgamento quando a profundidade do escoamento foi superior a 0,01 m e a sua duração é superior a 2 s. Enquanto o valor da duração foi escolhido de forma arbitrária, a profundidade mínima foi escolhida de acordo com Suzuki *et al.* (2020). O caudal médio galgado por cada evento foi calculado como a média dos vários valores de caudal instantâneo ao longo do evento. Em relação à análise do galgamento, calcularam-se dois parâmetros. A média dos caudais médios galgados ao longo da simulação ( $\langle q_m \rangle$ ) e o seu desvio padrão ( $\sigma_{qm}$ ).

### Resultados obtidos com base nas experiências numéricas

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos. Verifica-se que a redução de  $H_{m0}$  por rebentação induzida fundo inicia-se em 3500 m para o caso com o maior volume de praia e em aproximadamente 3625 m para o caso com o menor volume de praia. O aumento de profundidade entre a crista da barra submersa e a praia emersa induz valores de  $H_{m0}$  constantes ao longo ambos os perfis. Mais junto à praia emersa, verifica-se novamente uma redução de  $H_{m0}$  devido à rebentação induzida pelo fundo. Resumidamente, a variação dos valores de  $H_{m0}$  ao longo do perfil de praia é a esperada num perfil do tipo barra-fossa, caracterizada por duas zonas de rebentação bem distintas (ex., Mendes *et al.*, 2018).

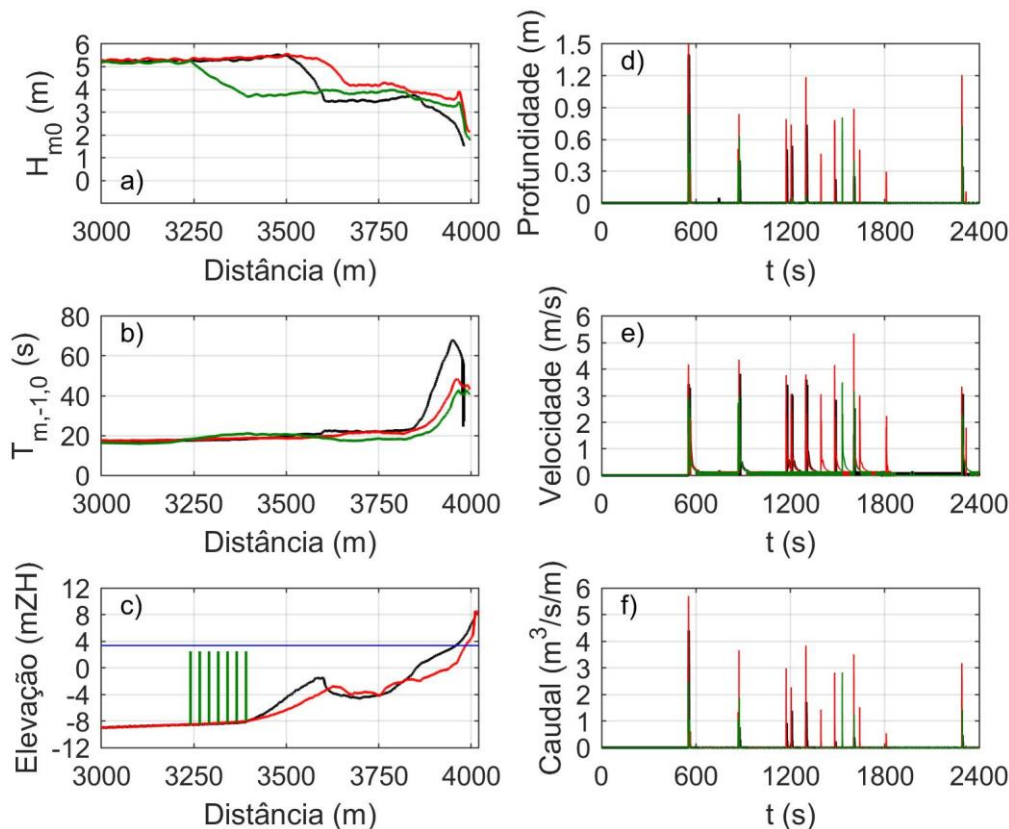


Figura 4. Variação dos parâmetros de agitação marítima (a, b) e da profundidade (c). Séries temporais de profundidade (d), velocidade (e) e caudal galgado (f) simuladas pelo SWASH retiradas dos perfis truncados. As linhas a preto (vermelho) referem-se ao perfil de 23/11/2020 (22/03/2021). As linhas a verde indicam as simulações com vegetação de 150 m para o perfil 22/03/2021. A linha a azul representa o nível de maré +3,37 mZH.

O valor de  $T_{m-1,0}$  junto à costa apresenta um aumento de 2,5 a 3 vezes do seu valor ao largo. Este aumento é devido à dissipação de energia das frequências associadas ao período de pico, e ao aumento de energia das frequências mais baixas (ex., Mendes *et al.*, 2018). Estas últimas são geralmente designadas por ondas infragravíticas. Este comportamento é o esperado devido às condições de tempestade simuladas.

Em termos de eventos de galgamento, o modelo SWASH simulou 8 eventos para o caso com um volume de praia grande (23/11/2020) e 13 eventos para o caso com um volume de praia





pequeno (22/03/2021) (Tabelas 4 e 5). Esta diferença é esperada uma vez que o aumento do volume de praia emersa devido a operações de alimentação artificial de praia, é uma solução frequentemente utilizada no âmbito da engenharia e gestão costeira por forma a mitigar o caudal galgado (Dean and Dalrymple, 2004).

A introdução de vegetação antes da profundidade de fecho ao longo de 150 m reduz o valor de  $H_{m0}$  em cerca de 27%. Apesar desta redução, o valor de  $H_{m0}$  junto à costa é inferior, mas semelhante ao caso sem vegetação (comparar linha a vermelho e a verde na Figura 4a). O valor de  $T_{m-1,0}$  é inferior para o caso sem vegetação (Figura 4b). A combinação destes fatores é responsável pela redução do caudal galgado em relação à situação sem vegetação para os dois perfis de praia (Tabelas 4 e 5). O aumento do comprimento da vegetação (L) também reduz o número de eventos de galgamento para as várias experiências numéricas efetuadas.

A redução de  $\langle q_m \rangle$  é de 0,303 m<sup>3</sup>/s/m para 0,180 m<sup>3</sup>/s/m (cerca de 40%) para o perfil com a berma de praia mais larga do caso sem vegetação para o caso com vegetação de 150 m. No perfil com a berma de praia mais estreita, a redução de  $\langle q_m \rangle$  é de 0,412 m<sup>3</sup>/s/m para 0,299 m<sup>3</sup>/s/m (cerca de 30%). Ou seja, a vegetação promove uma maior redução de  $\langle q_m \rangle$  quando a berma de praia apresenta maior largura. As experiências numéricas indicam igualmente que, para comprimentos de vegetação ao longo do perfil inferiores a 100 m, a sua influência na redução do galgamento é inferior a cerca de 15%. A variação dos valores de  $\sigma_{qm}$  com o aumento do comprimento de vegetação (L) não é monotónica, o que sugere uma análise futura mais aprofundada sobre este aspeto.

Tabela 4. Comparação do número de eventos de galgamento (# Eventos), média dos caudais médios galgados por evento ( $\langle q_m \rangle$ ) e desvio padrão dos caudais médios galgados por evento ( $\sigma_{qm}$ ) em função do comprimento da vegetação (L) para o caso com o maior volume da praia emersa (23/11/2020).

L (m)	# Eventos	$\langle q_m \rangle$ (m <sup>3</sup> /s/m)	$\sigma_{qm}$ (m <sup>3</sup> /s/m)
-	8	0,303	0,161
25	8	0,287	0,209
50	5	0,318	0,218
75	5	0,300	0,166
100	4	0,303	0,220
150	3	0,180	0,098
200	1	0,070	-

### Discussão sobre as experiências numéricas realizadas

O efeito da vegetação na redução do caudal galgado sobre obras de defesa costeira foi analisado para diques localizados nos Países Baixos (Vuik *et al.*, 2016). Estes autores recorreram a fórmulas empíricas do manual EurOtop (2007) em combinação com as características incidentes da agitação marítima no pé da obra obtidas com o modelo de propagação de agitação marítima SWAN. Os resultados obtidos permitiram afirmar que a redução do caudal galgado depende do comprimento da vegetação e da profundidade de água no pé da obra. Por exemplo, para um comprimento de vegetação de 100 m e uma profundidade de 3,5 m, o fator de redução é entre 100 e 1000.

Tabela 5. Comparação do número de eventos de galgamento (# Eventos), média dos caudais médios galgados por evento ( $\langle q_m \rangle$ ) e desvio padrão dos caudais médios galgados por evento ( $\sigma_{qm}$ ) em função do comprimento da vegetação (L) para o caso com o menor volume da praia emersa (22/03/2021).

L (m)	# Eventos	$\langle q_m \rangle$ (m <sup>3</sup> /s/m)	$\sigma_{qm}$ (m <sup>3</sup> /s/m)
-	13	0,412	0,160
25	9	0,395	0,175
50	9	0,373	0,102
75	8	0,347	0,197
100	8	0,311	0,165
150	8	0,299	0,140
200	6	0,220	0,070

No presente estudo, utilizou-se o modelo SWASH para simulação de um conjunto de experiências numéricas a fim de avaliar o efeito da vegetação no galgamento costeiro. A primeira diferença para o estudo de Vuik *et al.* (2016) é a localização espacial da vegetação. Enquanto estes autores colocaram a vegetação junto ao pé da obra, no presente estudo, a vegetação foi colocada ao largo da profundidade de fecho. O motivo para esta escolha encontra-se associado às condições de agitação marítima ao longo da costa oeste portuguesa, uma vez que se prevê que a colocação de vegetação junto ao pé da estrutura não seja compatível com o clima de agitação energético observado no local. Devido a tal realocização espacial da vegetação, o fator de redução, com valores da ordem de 100-1000 obtidos por Vuik *et al.* (2016), assumem, no presente estudo, valores inferiores a 1.

As características geométricas da vegetação utilizada neste estudo corresponderam a uma altura igual à profundidade local (cerca de 10 m), a um diâmetro de 0,05 m e a uma densidade de 5 plantas/m<sup>2</sup> (Burrows *et al.*, 2018). Apesar da representação esquemática da vegetação no modelo SWASH, estas características foram selecionadas tendo em conta uma variedade alargada de espécies de vegetação compatíveis com o seu crescimento e desenvolvimento, tanto na área de estudo, como em profundidade (Figura 5). Contudo, no futuro, será necessário aumentar o conhecimento sobre o crescimento esperado destas culturas, a sua resiliência durante períodos de tempestade, entre outros aspetos.

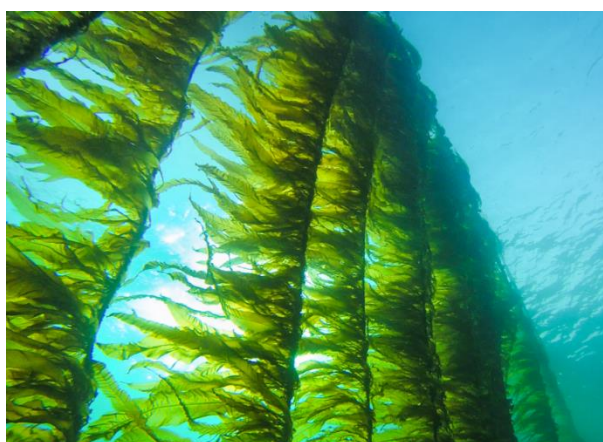


Figura 5. Cultivo de seaweed (adaptado de seaweedsolutions.com).



As experiências numéricas realizadas foram efetuadas para uma cota de coroamento 2,5 m inferior à existente na Praia da Vagueira. Apesar dos valores bastante elevados de caudal galgado, para uma situação (truncada) de projeto de uma obra costeira junto a uma frente urbana, as experiências numéricas indicam a redução do caudal galgado com o aumento do comprimento da vegetação. É de esperar um efeito semelhante da vegetação para caudais de galgamento inferiores ( $< 10$  l/s/m), apesar desta situação carecer de uma investigação mais detalhada em modelo físico.

## Conclusões

No presente trabalho, utilizou-se o modelo numérico SWASH para analisar o efeito da vegetação na cota de espraiamento e galgamento sobre obras de defesa costeira. Desta análise, conclui-se que:

- o modelo SWASH simula de forma adequada o parâmetro  $R_{2\%}$ , com e sem a presença de vegetação, quando comparado com resultados de ensaios em laboratório, apesar de apresentar uma subestimação desses valores para uma declividade de onda mais elevada;
- a colocação de vegetação para lá da profundidade de fecho reduz os valores de  $\langle q_m \rangle$  em função do comprimento da vegetação, sendo esta redução superior a 15% para comprimentos de vegetação superiores a 100 m;
- a redução do galgamento promovido pela vegetação é independente do perfil morfológico da praia.

O presente estudo indica uma redução do caudal galgado em obras de defesa costeira promovido pelo efeito da vegetação, que é independente da morfologia da praia. No futuro, a realização de ensaios em modelo físico e a utilização de modelos numéricos mais detalhados (ex., OpenFOAM) permitirão obter conclusões mais firmes. As condições de agitação marítima incidentes, o efeito do vento na geração local de agitação marítima, e a variabilidade longitudinal da praia também poderão constituir tópicos de análise futura. A análise do efeito da vegetação no espraiamento e no galgamento efetuado neste estudo constitui um passo para um melhor entendimento da utilização de NBS em combinação com obras de defesa costeira.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Kara Keimer (Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha) pela disponibilização dos dados medidos durante os ensaios em laboratório.

## Referências bibliográficas

- Agustin, L.N., Irish, J.L., and Lynnet, P. (2009). "Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation". *Coastal Engineering* 56(3), 332-340.
- Burrows, M.T., Fox, C.J., Moore, P., Smale, D., Sotheran, I., Benson, A., Greenhill, L., Martino, S., Parker, A., Thompson, E., and Allen, C.J. (2018). "Wild seaweed harvesting as a diversification opportunity for fisherman". A report for SRSL for HIE, 171 pp.
- Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. (2004) "Coastal Processes with Engineering Applications". Cambridge University Press, 475 pp.
- Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., and Marbà, N. (2013) "The role of coastal plant communities for climate change and adaptation". *Nature Climate Change* 3, 961-968.
- EuOtop (2007). "Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual". (T. Pullen, N.W.H. Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schuttrumpf & J.W. Van der Meer Eds.),



178 pp.

- Keimer, K., Schurenkamp, D., Miescke, F., Kosmalla, V. Lojek, O., and Goseberg, N. (2021). "Ecohydraulics of surrogate salt marshes for coastal protection: Wave-vegetation interaction and related hydrodynamics on vegetated foreshores at sea dikes". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 147(6), 04021035.
- Kobayashi, N., Raichle, A.W., and Asano, T. (1993) "Wave attenuation by vegetation". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 119(1), 30-48.
- Mendes, D., e Oliveira, T.C.A. (2021). "Deep-water spectral wave steepness offshore mainland Portugal". *Ocean Engineering* 236, 109548.
- Mendes, D., Pais-Barbosa, J., Baptista, P., Silva, P.A., Bernardes, C., and Pinto, C. (2021). "Beach response to a shoreface nourishment (Aveiro, Portugal)". *Journal of Marine Science and Engineering* 9(10), 1112.
- Mendes, D., Pinto, J.P., Pires-Silva, A.A., and Fortunato, A.B. (2018). "Infragravity wave energy changes on a dissipative barred beach: A numerical study". *Coastal Engineering* 140, 136-146.
- Narayan, S., Beck, M.W., Reguero, B.G., Losada, I.J., van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J.N., Ingram, J.C., Lange, G.-M., and Burks-Copes, K.A. (2016) "The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences". *PLoS ONE* 11(5), 1-17.
- Neves, D. (2019). "Air entrainment in wave breaking: experimental and numerical modelling". PhD Thesis, University of Lisbon, 237 pp.
- Ozeren, Y., Wren, D.G., and Wu, W. (2014). "Experimental investigation of wave attenuation through model and live vegetation". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 140(5), 04014019.
- Price, W.A., Tomlinson, K.W., and Hunt, J.N. (1968) "The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches". 11<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, 570-578.
- Reis, R.A., Pires-Silva, A.A., Fortes, C.J., and Suzuki, T. (2020). "Experiences with SWASH on modelling wave propagation over vegetation: comparisons with lab and field data". *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 20(2), 145-150.
- Smit, P., Zijlema, M. and Stelling, G. (2013). "Depth-induced breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model". *Coastal Engineering* 76, 1-16.
- Suzuki, T., Altomare, C., Veale, W., Verwaest, T., Trouw, K., Troch, P., and Zijlema, M. (2017). "Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH". *Coastal Engineering* 122, 108-123.
- Suzuki, T., Altomare, C., Yasuda, T., and Verwaest, T. (2020). "Characterization of overtopping waves on sea dikes with gentle and shallow foreshores". *Journal of Marine Science and Engineering* 8(10), 752.
- Suzuki, T., Hu, Z., Kumada, K., Phan, L.K., and Zijlema, M. (2019). "Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields". *Coastal Engineering* 149, 49-64.
- Vuik, V., Jonkman, S., Borsje, B.W., and Suzuki, T. (2016). "Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes". *Coastal Engineering* 116, 42-56.
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. (2011). "SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters". *Coastal Engineering* 58(10), 992-1012.