



UTILIZAÇÃO DE VEGETAÇÃO PARA CONTROLO DA SEDIMENTAÇÃO EM CANAIS DE NAVEGAÇÃO

Diogo Fonseca; Diogo Mendes; Salomé Mormentyn; Piet Haerens

HAEDES, Casais do Arrocho, 2025-452 Azóia de Cima, Portugal
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

diogo.fonseca@haedes.eu, diogo.mendes@haedes.eu, salome.mormentyn@haedes.eu;
piet.haerens@haedes.eu

Resumo

A incorporação de Soluções Baseadas na Natureza na gestão e manutenção de canais navegáveis é um fator com potencial para a redução da sedimentação nos canais, promovendo o aumento da resiliência destas infraestruturas. Neste trabalho, propôs-se uma solução de mitigação da sedimentação com base em vegetação. A análise desta nova solução foi feita com recurso ao modelo numérico XBeach. A taxa de assoreamento observada foi determinada através dos levantamentos disponíveis para o canal de acesso ao Cais da Bestida (Murtosa), executados antes e após a intervenção de dragagem. As configurações adotadas para o XBeach permitiram simular adequadamente a taxa de assoreamento observada. A realização de um conjunto de experiências numéricas com o XBeach permitiu efetuar uma análise de sensibilidade a vários parâmetros associados às características da vegetação: altura, diâmetro e densidade de colocação. Os resultados obtidos sugerem que a presença de vegetação nas margens do canal apresenta uma capacidade de redução em até 77% do assoreamento observado no canal. Por fim, estabeleceu-se um gráfico que correlaciona a taxa expectável de redução de assoreamento em função da altura e densidade da vegetação a considerar.

Introdução

Gestão, manutenção e desafios associados às vias navegáveis

A gestão e manutenção das vias navegáveis, a fim de garantir as condições de segurança à navegação, é uma das responsabilidades a cargo das Autoridades Portuárias e demais entidades com responsabilidade sobre o domínio da zona costeira.

Um dos desafios mais frequentes na gestão dos canais de navegação é o seu assoreamento. Este problema é tendencialmente controlado com recurso a dragagens de manutenção de forma a estarem garantidas as adequadas condições de navegação em segurança. No entanto, estas dragagens estão associadas a custos operacionais não desprezáveis, à emissão de CO₂ decorrente da operação das próprias dragas e a um potencial risco ambiental de contaminação da biodiversidade, o que motiva a procura de novas soluções e abordagens.

O dimensionamento de canais de navegação é realizado, atualmente, por aplicação de metodologias integradas que têm em conta, para lá da componente geométrica do canal, os processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos locais, as características e manobrabilidade das embarcações e a personalização de janelas de operacionalidade e navegação, que permitem assim reduzir significativamente os custos com as dragagens de primeiro estabelecimento. (Silveira et al., 2017).

Contudo, estas metodologias desprezam por completo a integrabilidade das Soluções Baseadas na Natureza e a sua potencialidade na redução do desafio da sedimentação, na captura e fixação de CO₂ e na mitigação do impacto ambiental das operações.

Uma das estratégias utilizadas para a contemplação do assoreamento esperado em canais de navegação consiste na realização de uma sobre-dragagem, isto é, no aumento da profundidade de dragagem para lá da cota nominal necessária (PIANC, 2014). No entanto, esta solução não

permite mitigar ou reduzir o assoreamento. Apenas permite aumentar a folga, ou o tempo necessário entre dragagens de manutenção.

Nenhuma abordagem é, assim, integralmente delineada através da criação de soluções que mitiguem o próprio processo de assoreamento e que, portanto, prolonguem a longevidade da solução, mas sim através de soluções sobredimensionadas que não reduzem o custo nem a longevidade da intervenção, mas apenas o intervalo entre intervenções consecutivas.

Objetivo

Neste trabalho apresenta-se uma abordagem alternativa de mitigação do assoreamento em canais navegáveis através da utilização de vegetação, a implementar nas margens desses canais. A análise sobre a redução da sedimentação no canal com a implementação da solução proposta será realizada com recurso ao modelo numérico XBeach que permite ter em conta o efeito da vegetação na hidrodinâmica e, consequentemente, no transporte sedimentar.

Breve revisão sobre o processo de sedimentação em canais de navegação

A deposição de sedimentos em canais de navegação em fundos não-coesivos é causada pela redução da capacidade de transporte de sedimentos devido à redução da velocidade do escoamento, pelo efeito de escorregamento das margens e pelo deslocamento horizontal das margens (van Rijn, 2018):

A orientação do canal de navegação em relação à hidrodinâmica predominante é um fator preponderante no processo de assoreamento, podendo esta orientação ser dividida em três casos (Figura 1):

- Escoamento unidirecional perpendicular (ou oblíquo) ao eixo principal do canal, que resulta na migração do canal na direção do escoamento, e deposição no canal por redução da capacidade de transporte (caso típico em rios);
- Escoamento de maré perpendicular ou oblíquo ao eixo principal do canal, que resulta na erosão (cuja simetria varia com a simetria da maré) em ambas as margens, e deposição no canal por redução da capacidade de transporte (caso típico em canais de navegação no interior de estuários);
- Escoamento de maré paralelo ao eixo principal do canal, o que resulta num achatamento das margens devido ao transporte de sedimentos das margens para o fundo por efeito de escorregamento (caso típico em embocaduras de maré).

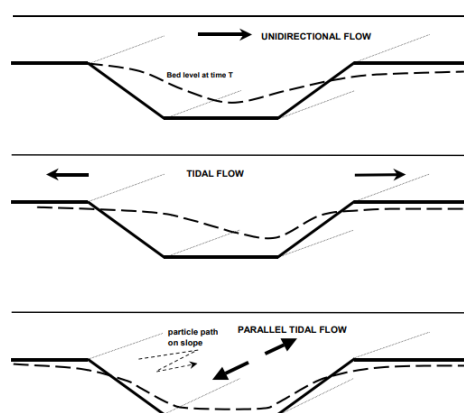


Figura 1. Casos de várias orientações do canal em relação à hidrodinâmica preponderante (van Rijn, 2018).



Modelo numérico XBeach e aplicação a um canal de navegação idealizado

Introdução e aplicações

O modelo numérico *eXtreme Beach behaviour* (XBeach) desenvolvido por Roelvink *et al.* (2009) é capaz de simular as alterações morfológicas que ocorrem em praias arenosas durante tempestades. Este modelo numérico pode ser configurado para simulações 2DH e 1D. O XBeach reproduz os processos físicos mais relevantes associados ao transporte sedimentar promovidos pela agitação marítima, como o transporte para a costa (*onshore*) promovido pelas assimetrias de onda (*wave skewness/assymetry*) e o transporte para o largo (*offshore*) promovido pela corrente de fundo (*undertow*) (Buhr Hansen and Svendsen, 1984). No caso de correntes induzidas pela maré, como é o presente estudo, o módulo de transporte sedimentar do XBeach também permite ter estas em conta para simular as alterações morfológicas.

O XBeach tem sido amplamente utilizado em estudos de dinâmica costeira (Roelvink *et al.*, 2009). A título de exemplo, McCall *et al.* (2010) verificaram que o XBeach é capaz de reproduzir cerca de 75% das diferenças de cota observadas na ilha barreira de Santa Rosa, EUA, após o furacão Ivan (2004).

Modelação numérica

O XBeach utiliza as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento integradas na vertical, que ao longo de um perfil transversal (1D), se traduzem nas seguintes equações:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = D_h \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F - \tau_b}{\rho h} \quad (2)$$

onde η é o nível de água, U é a velocidade do escoamento integrada na vertical ao longo do eixo x , h é a profundidade, D_h é a viscosidade turbulenta horizontal integrada na vertical, τ_b é a tensão de atrito no fundo ao longo do eixo x e F são as tensões associadas à agitação marítima – tensor de radiação, vegetação, entre outras. Na presente aplicação do modelo XBeach, F está apenas associado à vegetação.

O modelo de transporte sedimentar utiliza a seguinte equação de advecção-difusão, que ao longo de um perfil transversal (1D), lê-se

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + U \frac{\partial}{\partial x}(hC) - \frac{\partial}{\partial x} \left[D_s \frac{\partial}{\partial x}(hC) \right] = \frac{h(C_{eq} - C)}{T} \quad (3)$$

onde C é a concentração sedimentar integrada na vertical, D_s é um coeficiente de difusão associado ao transporte sedimentar, T é um tempo característico (*adaptation time*) e C_{eq} é uma concentração de equilíbrio obtida através de uma expressão semi-empírica para transporte sedimentar (Soulsby, 1997).

Efeito da vegetação

O efeito da vegetação é tido em conta no XBeach através da equação de Morison (van Rooijen *et al.*, 2016)

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D b_v h_v N_v U |U| \quad (4)$$

onde C_D é o coeficiente de arrastamento, b_v é o diâmetro equivalente de cada planta, h_v é a altura da planta e N_v é a densidade de colocação da vegetação (número de plantas por m^2).

De notar que se utilizou a terminologia “planta” em vez de “vegetação” uma vez que o efeito da vegetação é incorporado na equação de conservação da quantidade de movimento através da

analogia a um cilindro rígido (i.e., o efeito de uma “planta” isolada). Ou seja, o efeito da deformação da vegetação na hidrodinâmica resultante não é tido em conta pelo XBeach.

Na aplicação a soluções de engenharia, a determinação do valor de C_D em (4) constitui a dificuldade mais significativa, uma vez que os restantes parâmetros utilizados dependem das características geométricas da vegetação, sendo, portanto, de mais fácil estimação. van Rooijen *et al.* (2016) considerou valores de C_D que variam entre 0.2 e 1.7.

Resumidamente, o efeito da vegetação através de (4) é tido em conta no cálculo da hidrodinâmica (1-2), que por sua vez influencia o transporte sedimentar (3). No presente estudo, apenas se aborda o caso de transporte sedimentar promovido pela corrente de maré com ou sem vegetação, que é o caso característico de canais de navegação no interior de estuários.

Aplicação a um canal de navegação idealizado

Considerou-se um canal de navegação idealizado, com características geométricas semelhantes às do canal de acesso ao Cais da Bestida, localizado no concelho da Murtosa, na Ria de Aveiro (Figura 2).

A dragagem deste canal de acesso, promovida pela Polis Litoral Ria de Aveiro - Sociedade Para A Requalificação e Valorização da Ria de Aveiro, S.A., doravante designada PLRA, concretizou, numa empreitada que decorreu em finais de 2019, a criação de um canal de navegação com as seguintes características:

Largura de rasto	30,00 m
Cota de dragagem.....	-0,50 mZH
Declive dos taludes	1:10 (V:H)

De acordo com a informação disponibilizada pela PLRA, ao longo da empreitada foram executados, tanto pela parte da Entidade Executante como da Fiscalização, diversos levantamentos hidrográficos, totais ou parciais, por feixe simples e multifeixe, do canal de acesso ao Cais da Bestida. Consideraram-se os seguintes levantamentos no presente estudo: i) levantamento inicial (pré-dragagem), datado de 07/06/2019; ii) levantamento final (pós-dragagem), datado de 26/11/2019; iii) levantamento final (pós-dragagem), datado de 17/01/2020;

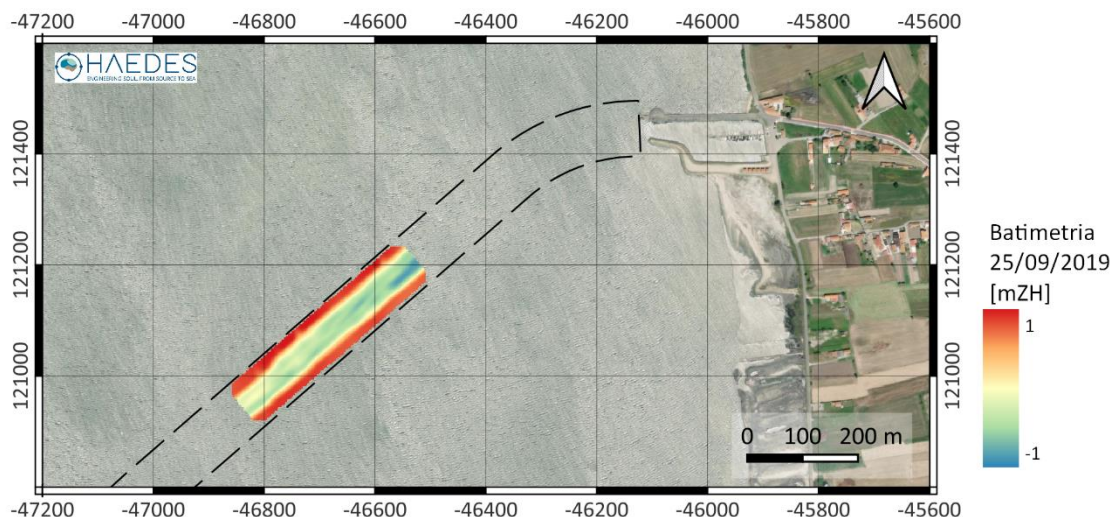


Figura 2. Representação em planta do traçado do canal de acesso ao Cais da Bestida e levantamento batimétrico obtido em 25/09/2019. As coordenadas horizontais estão referidas ao sistema de coordenadas PT-TM06 ETRS89.



Os levantamentos hidrográficos realizados indicam que os fundos adjacentes ao canal de acesso apresentavam, previamente à dragagem, a cota aproximada do eixo do canal de +0,70 mZH (Figura 3), situação que implicou a uma profundidade de dragagem na ordem de 1.20 m.

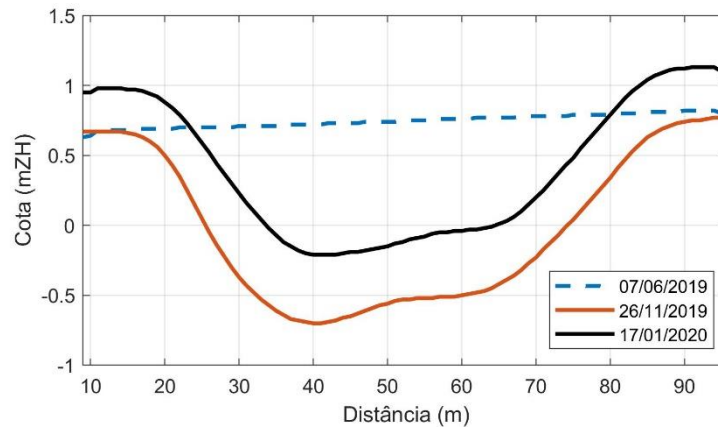


Figura 3. Perfis transversais médios dos levantamentos hidrográficos efetuados no canal de acesso ao Cais da Bestida, para a área de estudo apresentada na Figura 2.

Os estudos de modelação numérica da propagação de maré na Ria de Aveiro (PROMAN, 2014) permitiram quantificar as correções em altura do nível de maré entre o Cais da Bestida e a Barra de Aveiro. A correção em altura foi determinada em -0.18 m para preia-mar de águas-vivas e de +1.16 m para baixa-mar de águas-vivas, relativamente aos níveis de maré verificados no marégrafo da Barra de Aveiro, isto é, na entrada da Ria de Aveiro. Com base nestas correções, determinou-se um nível de água de marés vivas para o local de estudo que varia entre 1,77 m e 3,18 m durante baixa-mar e preia-mar, respetivamente.

Em relação às velocidades de maré, estes estudos de modelação numérica indicam que as velocidades máximas da corrente de maré no interior da Ria de Aveiro são, geralmente, inferiores a 1.0 m/s durante todo o ciclo de maré. Neste troço em particular, as velocidades situam-se em torno de 0.5 m/s, tanto na vazante como na enchente.

Os estudos sedimentológicos efetuados pela PLRA, e datados de 2016, indicam que, no canal de acesso ao Cais da Bestida, os sedimentos a dragar são constituídos maioritariamente por areias, cujo d_{50} se estima em cerca de 0.4 mm, sendo este o valor utilizado no presente estudo.

Configuração do modelo XBeach

Recorreu-se ao modelo XBeach para simular a taxa de assoreamento observada no canal de acesso ao Cais da Bestida. Utilizou-se a versão *stationary* do modelo XBeach. A resolução da malha computacional foi de 1,0 m e o passo de cálculo está restrito a um número de Courant de 0,7, para garantir a estabilidade numérica.

O domínio computacional foi alargado lateralmente, através da extensão dos limites em 200 m, para evitar problemas de condições de fronteira. Além disso, a 50 m de cada fronteira lateral foi criada uma zona não erodível, para que não fossem geradas instabilidades numéricas neste local.

A Tabela 1 apresenta a configuração do XBeach utilizada neste trabalho, resultado de diversas corridas de teste e sensibilidade. Estas corridas tiveram como objetivo, em parte, garantir uma velocidade de escoamento de aproximadamente 0,6 m/s para um sinal de maré com uma amplitude de 0,58 m.



Tabela 1. Configuração utilizada no modelo XBeach. (A descrição de cada parâmetro pode ser encontrada em: https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html).

Processos físicos	Parâmetros de escoamento	Parâmetros de transporte sedimentar
wavemodel = stationary sedtrans = 1 morphology = 1 avalanching = 1 viscosity =1 advection =1 struct = 1	bedfriction =manning bedfriccoef =.018	form =vanthiel_vanrijn tsfac =.9000 fallvelred =1

Comparação do modelo XBeach com os levantamentos hidrográficos

A Tabela 2 apresenta a comparação entre a média obtida para as cotas do fundo do canal observadas e simuladas (30 m da largura de rasto). A comparação apresenta uma diferença inferior a 1%, o que indica a capacidade do modelo XBeach para representar a taxa de assoreamento média observada no canal de acesso ao Cais da Bestida para as configurações do modelo utilizadas. Mais especificamente, os parâmetros *tsfac* e *fallvelred* foram modificados do seu valor padrão.

Tabela 2. Comparação entre a média obtida para as cotas do fundo do canal observadas e simulados.

Levantamento	Taxa de assoreamento média observada (mm/dia)	Taxa de assoreamento média simulada (m/dia)	Diferença (%)
L2	8.8958	8.8211	-0.8391%

O parâmetro *tsfac* está associado ao tempo de queda dos sedimentos (variável T em (3)). De acordo com o manual do XBeach (https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html), este parâmetro é um fator de correção ou calibração para ter em conta que a velocidade de queda dos sedimentos é determinada através de um modelo integrado na vertical. Neste trabalho utilizou-se $tsfac = 0,9$. O parâmetro *fallvelred* está associado à redução da velocidade de queda de sedimentos devido a concentrações elevadas. Neste trabalho, verificou-se que a utilização deste parâmetro, em combinação com $tsfac = 0,9$, permite reduzir as diferenças entre a taxa de assoreamento média observada e simulada.

A comparação efetuada permite utilizar o modelo XBeach para analisar o efeito da vegetação na taxa de assoreamento para o canal de acesso ao Cais da Bestida. De notar que as configurações utilizadas no XBeach neste trabalho só são válidas para este caso de estudo.

Solução de mitigação de sedimentação em canais de navegação através de vegetação

A solução de mitigação da sedimentação em canais de navegação proposta neste estudo consiste na colocação de biorolos vegetados nas margens do canal de navegação (Figura 4). Estes biorolos consistem em rolos cilíndricos em fibra de coco compacta, de densidade homogénea, externamente reforçados com uma rede estrutural, e internamente vegetados com rizomas ou bolbos de espécies aquáticas. Após a sua germinação, em viveiro ou estufas, os biorolos com as espécies de vegetação selecionadas são posteriormente colocados, com recurso a meios marítimos, junto ao fundo marinho, nas margens do canal de navegação.

A geometria simulada considerou a colocação dos biorolos paralelamente ao canal de navegação, sendo que a sua colocação junto ao fundo marinho seria efetuada, por deposição controlada, e com recurso a equipas de mergulhadores, ao longo de uma fiada longitudinal.

Uma vez que a presente solução se enquadra nas designadas técnicas de engenharia natural, o período de vida útil estimado é significativamente inferior a uma solução de engenharia não-natural. Contudo, é de esperar que este tipo de soluções apresentem um período de vida útil em linha com o horizonte temporal dos projetos de dragagens de manutenção (entre 1 a 10 anos).



Figura 4. Biorolos com vegetação (esquerda) e sem vegetação (direita). Referência: <http://ecosalix.pt/produto/bio-rolol/>.

Apesar da solução proposta, a mitigação do efeito de sedimentação em canais de navegação poderá igualmente ser obtida através da introdução de vegetação por outras técnicas, tais como, sementeira, estacaria viva, fascina viva, entre outras. (Fernandes e Freitas, 2011).

Quanto à vegetação a adotar, as espécies existentes em zonas de baixo sapal, estão, geralmente, sujeitas a uma grande variação nos ciclos das marés e às forças erosivas da corrente e das ondas, permitindo-lhes sobreviver num ambiente mais severo e resistir a uma grande diferença de nível de maré (tanto emerso como submerso). Além disso, de acordo com muitos estudos, a dinâmica de sedimentação em zonas de sapal baixo está fortemente correlacionada com o tipo, cobertura e altura da vegetação. Por exemplo, *Puccinellia maritima*, uma espécie comum em zonas estuarinas, da família *Poaceae*, reduziu a frequência e magnitude dos eventos de erosão e aumentou significativamente a acreção de sedimentos (Langlois *et al.*, 2003).

A Figura 5 apresenta um esquema indicativo da solução preconizada para controlo da sedimentação, e da sua posição relativa face ao canal de navegação.

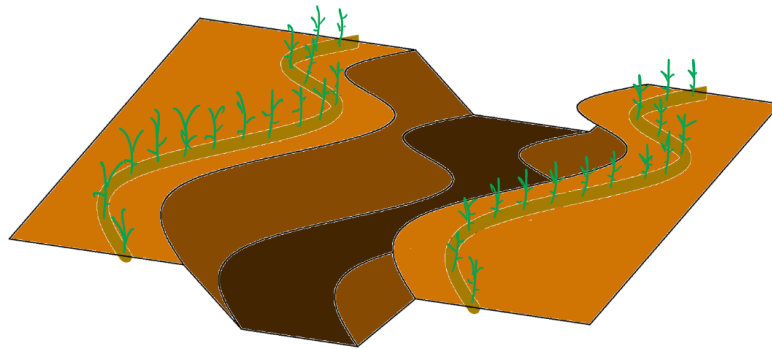


Figura 5. Esquema de posicionamento dos biorolos com vegetação ao longo do canal de navegação.

Experiências numéricas com o XBeach: efeito da vegetação no controlo da sedimentação em canais de navegação

As experiências numéricas foram realizadas para analisar o efeito da altura da vegetação, diâmetro equivalente da vegetação e densidade da vegetação na redução da taxa de assoreamento no canal de navegação. Ou seja, para compreender os requisitos geométricos da vegetação necessários para reduzir a taxa de assoreamento no canal de navegação da Bestida, em relação à situação de referência.

A altura da vegetação variou entre 0,10 m e 0,75 m, o diâmetro equivalente da vegetação entre 0,01 m e 0,10 m e a densidade da vegetação entre 10 plantas/m² e 50 plantas/m². No XBeach, considerou-se a colocação da vegetação afastada 15 m do limite superior dos taludes do canal, numa largura de 5 m, em ambas as margens (Figura 6).

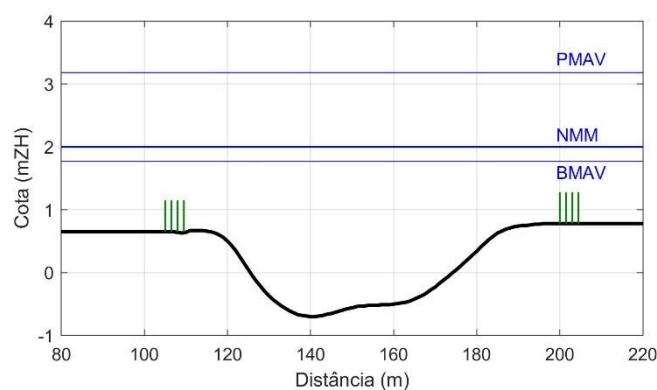


Figura 6. Batimetria e vegetação utilizada no modelo numérico XBeach. As linhas a azul indicam os vários níveis de maré para o canal de acesso ao Cais da Bestida.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para as experiências numéricas realizadas. De forma geral, verifica-se que a vegetação permite reduzir a taxa de assoreamento em relação ao caso sem vegetação. Esta redução varia entre 14% e 77%.



Tabela 3. Taxa de assoreamento média simulada e variação face ao valor simulado sem vegetação para as várias experiências numéricas.

Simulação	h_v	b_v	N_v	Taxa de assoreamento média simulada (mm/dia)	Variação em relação ao valor simulado sem vegetação (%)
H1	0.50	0.05	20	4.1240	-53.25%
H2	0.75	0.05	20	2.8622	-67.55%
H3	0.25	0.05	20	5.9800	-32.21%
H4	0.1	0.05	20	7.5081	-14.88%
B1	0.50	0.01	20	7.5475	-14.44%
B2	0.50	0.10	20	1.9852	-77.49%
B3	0.50	0.03	20	5.5608	-36.96%
B4	0.50	0.07	20	3.0724	-65.17%
N1	0.50	0.05	10	5.9979	-32.01%
N2	0.50	0.05	30	2.8559	-67.62%
N3	0.50	0.05	5	7.2616	-17.68%

O aumento da altura da vegetação, da densidade da vegetação (número de plantas por m²) e do diâmetro equivalente da vegetação, de forma isolada, também permite reduzir a taxa de assoreamento no canal de navegação.

Da análise aos coeficientes de regressão linear entre a taxa de assoreamento e os conjuntos de parâmetros associados à vegetação (altura, diâmetro equivalente e densidade da vegetação) (Figura 7) conclui-se que: 1) um aumento de 0,10 m na altura de vegetação traduz-se numa redução de 0,70 mm/dia na taxa de assoreamento; 2) um aumento de 0,01 m no diâmetro equivalente da vegetação traduz-se numa redução de 0,60 mm/dia na taxa de assoreamento; e 3) um aumento da densidade da solução em 10 plantas/m² traduz-se numa redução de 1,70 mm/dia na taxa de assoreamento.

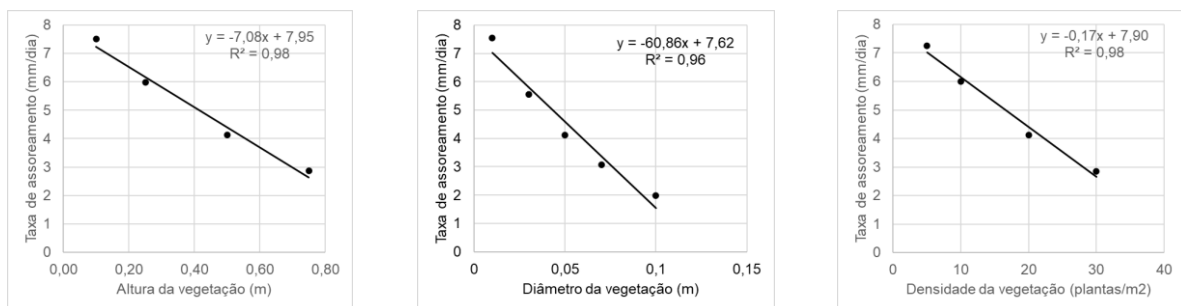


Figura 7. Coeficientes de regressão linear entre a taxa de assoreamento e o conjunto de parâmetros associados à vegetação.

Apesar da redução esperada na taxa de assoreamento devido à equação (4), os resultados obtidos permitem atribuir valores de redução da taxa de assoreamento adaptados ao caso específico do canal de acesso ao Cais da Bestida, quando implementada uma solução de



revestimento das margens com vegetação.

De acordo com Van Rijn (2018), o assoreamento dos canais de navegação pode ser devido às velocidades associadas à maré, perpendiculares ou oblíquas ao eixo principal, que originam a erosão das margens, e uma posterior deposição no canal, por redução da capacidade de transporte. Para as experiências numéricas efetuadas, a velocidade de maré nas margens é menor do que a situação sem vegetação. Para o caso H1 (Tabela 3), estas velocidades são reduzidas em cerca de 10% durante o pico da enchente e da vazante. Por isso, sugere-se que o efeito da vegetação no assoreamento de canais de navegação é o de diminuir a erosão das margens devido à redução das velocidades de maré.

Do ponto de vista prático do dimensionamento de soluções deste género, carece a existência de uma relação que permita associar a taxa de redução esperada com as características geométricas da solução a adotar.

Ora, tomando em consideração que o diâmetro equivalente da espécie de vegetação a adotar constitui um parâmetro de difícil quantificação e controlo, desenvolveu-se um conjunto adicional de experiências numéricas que permita facilmente estabelecer uma relação entre a altura e a densidade da vegetação e a redução esperada na taxa de assoreamento no canal de navegação.

As simulações adicionais foram desenvolvidas considerando constantes os valores de C_D em 0,5 e o valor de b_v em 0,05 m, sendo os resultados apresentados na Figura 8. A taxa de redução aumenta com o aumento da densidade e da altura de vegetação, como anteriormente apresentado. Utilizando uma altura de 0,60 m e uma densidade de 8 plantas/m² obtém-se uma taxa de redução de 30%. A mesma taxa pode ser obtida para uma altura mais baixa (0,25 m) porém com uma densidade mais elevada (20 plantas/m²). Para obter taxas de redução superiores a 50% com a solução proposta, será necessária uma altura de vegetação superior a 0,50 m com pelo menos 20 plantas/m².

Através deste tipo de análise/gráfico é assim possível definir um conjunto de espécies alargado, ajustado às condições locais, que, apesar de não apresentarem a mesma configuração geométrica (altura ou densidade de colocação) são responsáveis pela mesma taxa de redução do assoreamento no canal. A utilização de diferentes espécies em soluções deste tipo é também recomendada uma vez que promove a biodiversidade e a resiliência dos próprios ecossistemas.

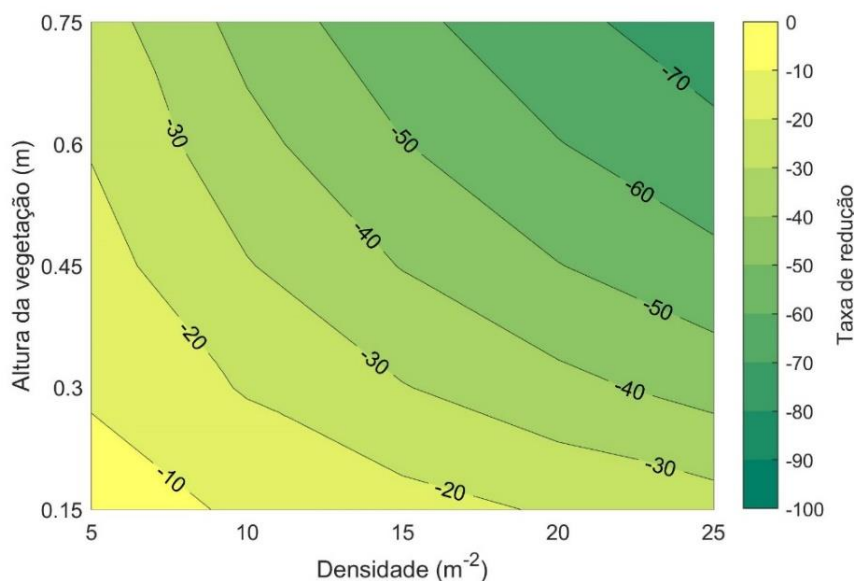


Figura 8. Variação da taxa de redução simulada em função da altura e da densidade de colocação da espécie de vegetação.



Conclusões

No presente trabalho, propôs-se uma solução para redução do assoreamento em canais de navegação baseada em vegetação (biorolos vegetados). Uma primeira ordem de grandeza do efeito desta solução foi estimada com recurso ao modelo numérico XBeach. Desta análise, conclui-se que:

1. o modelo XBeach pode ser configurado para simular de forma adequada a taxa de assoreamento observada após a dragagem do canal de acesso ao Cais da Bestida;
2. a vegetação promove a redução das velocidades de maré nas margens dos canais de navegação, o que dificulta a erosão das margens e reduz a taxa de assoreamento no canal;
3. a colocação de vegetação nas margens do canal de navegação permitiu uma redução entre 14% e 77% comparativamente com a taxa de assoreamento sem vegetação;
4. a utilização de vegetação com uma altura superior a 0,50 m e com uma densidade de pelo menos 20 plantas/m² permitiu reduzir em 50% a taxa de assoreamento no canal.

É de realçar o esforço da PLRA na garantia da existência de levantamentos hidrográficos efetuados com periodicidade adequada após a execução dos trabalhos de dragagem. Este esforço permite fornecer dados úteis para analisar, por exemplo, o assoreamento de canais de navegação, e testar novas soluções ou abordagens.

No futuro, propõe-se investigar a geometria de colocação da vegetação (altura, diâmetro equivalente e densidade), o tipo de espécie de acordo com cada local, a aplicação de um modelo morfodinâmico bidimensional ao caso de estudo, ensaios laboratoriais e até a estudos-piloto *in situ*. Estes passos são fundamentais para a criação de conhecimento associado à utilização de Soluções Baseadas na Natureza em canais e vias navegáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Polis Litoral Ria de Aveiro - Sociedade Para A Requalificação e Valorização da Ria de Aveiro, S.A. pela disponibilização dos dados relativos ao canal de acesso ao Cais da Bestida.

Referências bibliográficas

- Buhr-Hansen, J., e Svendsen, I.A. (1984). "A theoretical and experimental study of undertow". 19th International Conference on Coastal Engineering, 2246-2262.
- Fernandes, J., e Freitas, A. (2011). "Introdução à Engenharia Natural – Volume II". EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A., 107pp.
- Langlois, E., Bonis, A., and Bouzillé, J.B. (2003). "Sediment and plant dynamics in saltmarshes pioneer zone: *Puccinellia maritima* as a key species?". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56(2), 239-249.
- McCall, R.T., de Vries, J.V.T., Plant, N.G., van Dongeren, A., Roelvink, J.A., Thompson, D.M., and Reniers, A.J.H.M. (2010) "Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modelling at Santa Rosa Island". *Coastal Engineering*, 57(7), 668-683.
- PIANC (2014) "Harbour approach channels design guidelines". Report nº 121-2014, 311 pp.
- PROMAN (2014) "Projetos de Transposição de Sedimentos para a Otimização do Equilíbrio Hidrodinâmico na Ria de Aveiro e da Pateira de Fermentelos, Volume III – Estudos Complementares, Tomo 3 – Estudos em Modelo Matemático Hidrodinâmico", 179pp.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., de Vries, J.V.T., McCall, R.T., and Lescinski, J. (2009) "Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands". *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152.



- Silveira, L., Gomes, G., Taiani, L., Pinheiro, V., Benedet, L., Marques, A., and Loureiro, C. (2017) "Integrated method for optimal channel dredging design". *Terra et Aqua* 146, 5-16.
- Soulsby, R. (1997). "Dynamics of marine sands: A manual for practical applications". Thomas Telford Publications, 249 pp.
- van Rijn, L.C. (2018) "Basics of channel deposition/siltation". (www.leovanrijn-sediment.com) 29 pp.
- van Rooijen, A.A., McCall, R.T., de Vries, J.V.T., van Dongeren, A., Reniers, A., and Roelvink, J.A. (2016). "Modeling the effect of wave-vegetation interaction on wave setup". *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), 4341-4359.