



MODELAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO FÍSICO DE SOLUÇÕES DE TRANSPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM EMOCADURAS

Margarida Ferreira¹; Carlos Coelho¹; Paulo A. Silva²; Tiago Oliveira²; Nuno Monteiro²; Márcia Lima^{1,3,4};
Ricardo Carvalho⁵; Celso Pinto⁶; Bruno Pires⁶

¹RISCO e Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro (UA), ²CESAM e Departamento de Física, UA, ³R5 Marine Solutions, ⁴DREAMS - ULP, ⁵Oceaning, ⁶Agência Portuguesa do Ambiente
margarida.ferreira@ua.pt, ccoelho@ua.pt, psilva@ua.pt, toliveira@ua.pt, nunom@ua.pt,
marcialima@r5engineers.com, ricardo.carvalho@oceaning.pt, celso.pinto@apambiente.pt,
bruno.pires@apambiente.pt

Resumo

No presente trabalho, aplicou-se o modelo numérico LTC (Coelho, 2005), para avaliar o impacto de soluções de transposição de sedimentos na evolução da posição da linha de costa, a 30 anos (2050), a sotamar das embocaduras da Ria de Aveiro e do Rio Mondego. As soluções avaliadas contemplaram sistemas de grande capacidade de transposição artificial de sedimentos, com dragagem a Norte das barras portuárias e deposição a Sul. Os resultados mostram que as soluções de transposição permitem mitigar os problemas de erosão que ocorrem nas duas áreas de estudo, sendo os sistemas de transposição artificial contínuos as soluções com maior capacidade de contrariar o recuo da linha de costa e a tendência erosiva instalada. Contudo, os impactos são distintos nos dois setores costeiros, apresentando os sistemas de transposição melhores desempenhos no setor Figueira da Foz-Leirosa. Entre outros fatores, esta diferença é atribuída em parte ao caudal sedimentar longitudinal, que se concluiu ser mais intenso em Aveiro.

Introdução

Os setores costeiros localizados a sotamar das embocaduras da Ria de Aveiro e do Rio Mondego (setor Barra-Vagueira e setor Figueira da Foz-Leirosa, Figura 1), do litoral Oeste português, apresentam problemas de erosão, com recuo generalizado da posição da linha de costa (Lira *et al.*, 2016). A ação da agitação marítima, considerada um dos principais agentes de transporte dos sedimentos ao longo da costa Oeste portuguesa, caracteriza-se por ser muito energética, induzindo uma deriva litoral potencial líquida próxima de 1×10^6 m³/ano, que se processa de Norte para Sul (Santos *et al.*, 2014). A retenção de sedimentos a barlar das estruturas portuárias, que definem a fronteira Norte dos setores costeiros, é apontada como uma das causas para o défice sedimentar e conseqüente recuo da posição da linha de costa, levando a que se equacionem soluções de transposição de sedimentos através das barras portuárias, com o objetivo de aproximar a dinâmica sedimentar à deriva natural que ocorria no litoral e de mitigar os efeitos erosivos destas estruturas portuárias a sotamar.

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito do “Estudo de Viabilidade de Transposição Aluvionar das Barras de Aveiro e da Figueira da Foz”, realizado para a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), teve como objetivo avaliar o desempenho físico (impacto na evolução da posição da linha de costa) de soluções de transposição de sedimentos a 30 anos (2050), para as embocaduras da Ria de Aveiro e do Rio Mondego. Para tal, uma vez que, o desempenho e longevidade das intervenções de mitigação do défice sedimentar é dependente da distribuição dos sedimentos ao longo da costa, o estudo apresentado compreendeu duas fases. Na primeira fase caracterizou-se o potencial de transporte sólido longitudinal nas áreas de estudo. Na segunda fase recorreu-se às potencialidades da modelação numérica para avaliar o impacto, na evolução da posição da linha de costa, num horizonte de 30 anos, de diferentes soluções de transposição de sedimentos. As soluções de transposição avaliadas contemplaram sistemas de transposição contínua (*by-pass*) e alimentações artificiais de sedimentos, com recurso a operações de dragagem a Norte das barras e deposição a Sul.

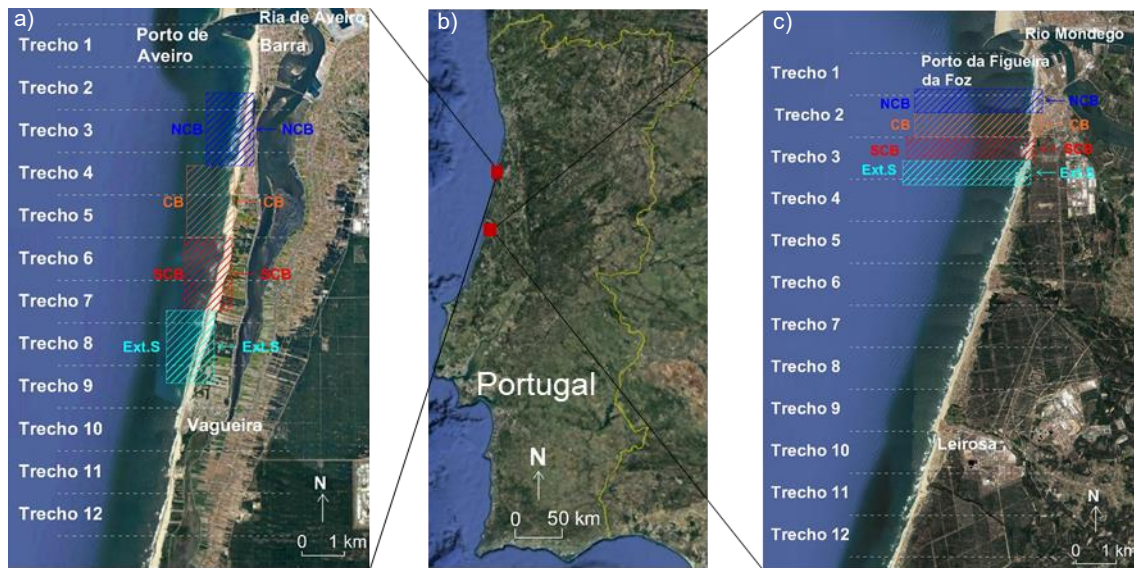


Figura 1. Áreas de estudo (Google Earth, 2021): a) Barra-Vagueira; b) Portugal Continental; c) Figueira da Foz-Leirosa. CB - local definido para implementação do Cenário Base; NCB - localização a Norte do local do Cenário Base; SCB - localização imediatamente a Sul do Cenário Base; Ext.S - localização mais a Sul da região modelada. Os retângulos representam as localizações das alimentações artificiais e as setas representam as saídas do sistema *by-pass*.

Caudal Sedimentar Longilitoral

Metodologia

O caudal sólido nas embocaduras da Ria de Aveiro e do porto da Figueira da Foz foi estimado para o período dos últimos 20 anos e em cenários de alterações climáticas. Este estudo teve como base a simulação numérica da propagação da ondulação e a aplicação de formulações empíricas para estimar o transporte potencial. A simulação dos regimes de agitação foi efetuada com o modelo WAVEWATCH III (Tolman, 2009) considerando duas malhas aninhadas com representação de escala global do Atlântico Norte (resolução de 0.5°) e de escala local na costa ocidental de Portugal continental (resolução de 0.018°). O modelo foi forçado por ventos do ERA5 para o período compreendido entre 2000 e 2019 (últimos 20 anos) e para os períodos futuros considerou os ventos climatológicos do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*) para o cenário SSPs-8.5, que assume as emissões mais elevadas de gases de efeitos de estufa. Os dados de vento CMIP6 foram retirados do modelo MPI-ESM-1 (*Max Planck Institute for Meteorology*) para três períodos: i) 2000 a 2015 (período histórico) ii) 2020 a 2040 (cenário SSPs-8.5) e iii) 2080 a 2100 (cenário SSPs-8.5). O transporte sólido potencial foi calculado com base na formulação de CERC com a modificação proposta em Mil-Homens *et al.* (2013). Como a malha do modelo WWIII na zona costeira tem uma resolução de 2 km, não é possível descrever com precisão as condições da ondulação na rebentação. Desta forma utilizou-se a teoria linear e a lei de Snell para estimar a altura da onda e ângulo na rebentação a partir das soluções numéricas do modelo WWIII obtidas a uma profundidade de cerca de 15m.

Resultados

Os valores médios do saldo do transporte sólido litoral, estimados para o período dos últimos 20 anos em ambas as regiões costeiras, enquadram-se nos valores de referência citados na bibliografia: cerca de 746 000 m³/ano na Figueira da Foz e de 996 000 m³/ano no litoral de Aveiro. Em ambos os casos, o transporte tem o sentido preferencial de Norte para Sul, e apresenta uma sazonalidade marcada com valores mais elevados nos meses de inverno marítimo, e menores nos meses do verão marítimo (Figura 2).

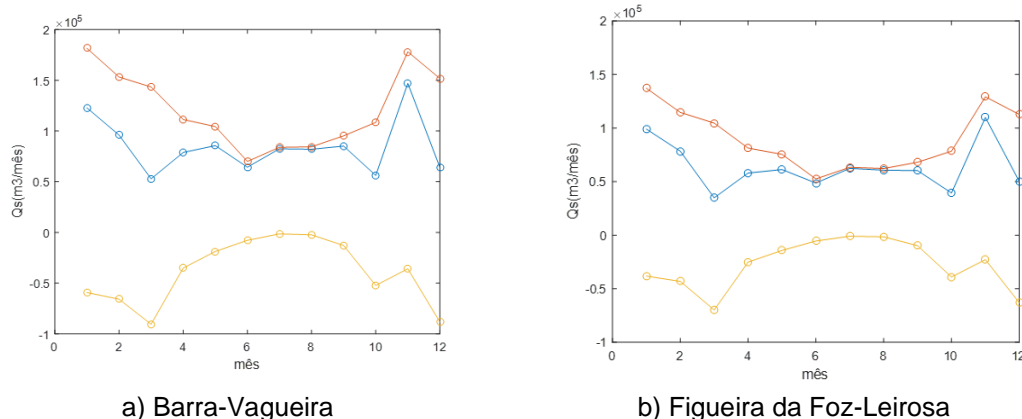


Figura 2. Valores médios mensais do transporte líquido (curva azul), componente N-S (curva a vermelho) e componente S-N (curva a laranja).

Nos cenários futuros simulados para dois horizontes temporais, 2020-2039 e 2080-2099, os resultados mostram uma tendência para uma diminuição do saldo do transporte sólido. Por exemplo, para o horizonte temporal de 2080-2099 os valores diminuem cerca de 23% para Aveiro e 12% na Figueira da Foz relativamente aos valores estimados no período histórico. Este comportamento também foi observado por Ferreira *et al.* (2021). Este decréscimo resulta de uma diminuição do transporte nos meses do inverno marítimo que estão associados a uma intensificação dos volumes transportados no sentido Sul-Norte, não sendo evidente uma intensificação do transporte no sentido positivo, de Norte para Sul. Nos meses de verão marítimo, observou-se uma intensificação da componente do transporte positivo do que resulta um aumento do caudal sólido líquido para Sul. Estes resultados foram interpretados recorrendo à modificação dos climas de agitação futuros, face ao simulado no período histórico de referência: a tendência de rotação da direção da agitação marítima no sentido anti-horário nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e para condições de temporal, e a tendência de rotação da agitação marítima no sentido horário durante os meses de verão marítimo.

Evolução da Posição da Linha de Costa

O trabalho de modelação numérica da evolução da posição da linha de costa teve por objetivo antecipar qual a melhor forma de realizar a transposição de sedimentos a sotamar da embocadura da Ria de Aveiro e do Rio Mondego, de forma a repor o trânsito sedimentar, mitigando os problemas de erosão costeira que se verificam a sotamar. Inicialmente, apresenta-se a metodologia adotada, incluindo a descrição dos cenários avaliados para a transposição de sedimentos. Posteriormente, descreve-se o processo de calibração e validação do modelo numérico utilizado para obter a evolução da posição da linha de costa. Por último, os resultados obtidos são analisados e discutidos.

Metodologia

O desempenho e longevidade das intervenções de transposição e/ou deposição de sedimentos são condicionadas por múltiplos fatores. Nesse sentido, aplicou-se o modelo numérico LTC - *Long Term Configuration* e avaliou-se a evolução da posição da linha de costa, em cada uma das áreas de estudo, para um conjunto de cenários definidos com o objetivo de discutir diferentes parâmetros que condicionam o desempenho e longevidade das intervenções.

O LTC, desenvolvido na Universidade de Aveiro por Coelho (2005), é um modelo de uma linha para aplicação a praia arenosas. O modelo aplica a equação da continuidade e considera que as principais causas de alteração da posição da linha de costa se devem aos gradientes de transporte sedimentar longitudinal e às condições fronteira da grelha modelada. Através do LTC é possível simular a evolução da posição da linha de costa para um conjunto diversificado de



intervenções costeiras, como alimentações artificiais de sedimentos, esporões, quebramares e sistemas de *by-pass*. Para simular alimentações artificiais o utilizador tem de definir os parâmetros relacionados com o volume total de sedimentos depositado, área de intervenção e tempo de realização da intervenção (instantes de tempo em que começa e é concluída a intervenção). Para simular sistemas de *by-pass* o utilizador tem de definir o caudal sólido de sedimentos adicionado ao sistema, considerado constante e contínuo ao longo da simulação, e a localização da saída do sistema ao longo da costa (Coelho, 2005).

Para definir os cenários a avaliar, começou-se por definir um Cenário Base (designado por CB), suportado na análise do histórico de intervenções realizadas nos setores costeiros em estudo. Para os dois setores costeiros, o volume de alimentação artificial de sedimentos de referência, quer para os cenários de dragagem e deposição, quer para os cenários de transposição contínua, foi definido como 500 000 m³/ano. O local de referência para a deposição dos sedimentos no setor Barra-Vagueira foi considerado como a área compreendida ente a linha batimétrica dos -12.00 m (ZH) e o limite de espraiamento (correspondendo aproximadamente à largura do perfil ativo), e entre o 3.º e 5.º esporões do campo de esporões da Costa Nova (correspondendo a uma extensão ao longo da linha de costa de 1700 m). No setor Figueira da Foz-Leirosa o local de referência da deposição de sedimentos foi considerado como a área compreendida ente a linha batimétrica dos -12.00 m (ZH) e o limite de espraiamento, e em frente aos 3.º e 5.º esporões do campo de esporões da Cova Gala (correspondendo a uma extensão ao longo da linha de costa de aproximadamente 600 m). Para os cenários de transposição, o local de referência para a saída de sedimentos do sistema foi definido como a meio da extensão longitudinal da área abrangida pelas intervenções de deposição de sedimentos.

Definindo o Cenário Base, foram depois definidos um conjunto de cenários (10 de dragagem e deposição e 10 de transposição contínua tipo *by-pass*), por alteração de um parâmetro de cada vez ao Cenário Base. Os parâmetros avaliados foram: volume, local de deposição em planta e frequência de intervenção, para as soluções de dragagem e deposição, e volume, local da saída do sistema e número de saídas, para os sistemas *by-pass*. Na Figura 3 sintetizam-se os cenários avaliados, sendo esquematizadas na Figura 1 as designações e localizações em planta selecionadas para avaliar o impacto do parâmetro local de deposição dos sedimentos e localização da saída do sistema de transposição contínua, em cada área de estudo.

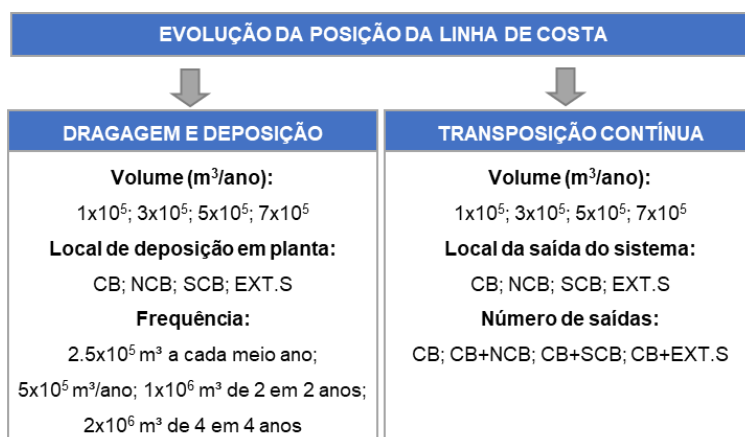


Figura 3. Cenários avaliados (as localizações selecionadas para a deposição dos sedimentos e saídas dos sistemas *by-pass* são apresentadas na Figura 1).

Para cada um dos cenários foi avaliado o impacto da solução de transposição, em termos de evolução da área de território não perdida, quantificada através da comparação da posição da linha de costa num determinado instante, considerando o cenário de referência, com a posição da linha de costa no mesmo instante, admitindo-se a realização de intervenções de mitigação da



erosão costeira (cenário em avaliação). O cenário de referência corresponde à evolução natural da posição da linha de costa, isto é, admitindo a manutenção das obras existentes, mas não acrescentando mais nenhuma intervenção

O cenário de agitação marítima utilizado como *input* do modelo numérico, para projeção da evolução da linha de costa a 30 anos correspondeu à série de registos de ondas RCP8.5 gerada no âmbito do projeto MarRisk (2017), que corresponde à série de registos de ondas com concentrações de gases de efeitos de estufa mais desfavorável. Esta série, originalmente com 20 anos (2026-2045), obrigou a que se repetissem os primeiros cinco e os últimos cinco anos de registos de ondas, de forma a perfazer os 30 anos, horizonte temporal pretendido para a análise. Em todas as simulações considerou-se o efeito da subida do nível médio da água do mar, definido igual a 6 mm/ano, com base na análise dos valores indicados pela Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2019) e no valor referido por Antunes (2019) para a costa portuguesa (cenário intermédio Mod.FC 2).

Definição do setup de modelação, calibração e validação

A preparação do domínio de cálculo, para o setor Barra-Vagueira foi realizada com base na identificação da posição da linha de costa nos levantamentos de julho de 2018, do programa COSMO (2018) e Pinto *et al.* (2021). A partir da posição da linha de costa foi construída uma malha topo-hidrográfica regular, segundo duas direções ortogonais (malha com 20x20 m² de resolução, nas direções Oeste-Este e Sul-Norte), com uma extensão de 6x12 km². A batimetria, baseada nos referidos levantamentos, foi aproximada à forma do perfil de praia de Dean, e a topografia foi aproximada a um declive constante e igual a 3%.

Para o setor Figueira da Foz-Leirosa, a batimetria considerada foi baseada na carta náutica n.º 24202 do Fólio Novo do Instituto Hidrográfico (IH), à escala 1:150 000, editada em junho de 2001, resultante da compilação de levantamentos hidrográficos realizados entre 1978 e 1995, sendo que a zona mais junto à linha de costa terá sido sondada em 1978. A altimetria considerada integra um levantamento topográfico do litoral português, realizado em 1996, fornecido pelo Instituto da Água, e a digitalização das cartas militares do Instituto Geográfico Português n.º 227B, 228, 238A e 239, editadas em 1998, resultantes de trabalho de campo de 1996, à escala 1:25000, do Instituto Geográfico do Exército. Com base neste conjunto de dados foi construída uma malha topo hidrográfica regular, segundo duas direções ortogonais (malha com 100 m de resolução na direção Oeste-Este e 75 m de resolução na direção Sul-Norte), com uma extensão de 35x12.6 km².

Para cada um dos domínios de cálculo, inclui-se nos *setups* de modelação as obras de defesa costeira existentes em cada área de estudo. No setor Barra-Vagueira consideraram-se 19 obras de defesa costeira (8 esporões e 11 obras longitudinais aderentes). No setor Figueira da Foz-Leirosa foram incorporadas no domínio de modelação 14 obras de defesa costeira (8 esporões e 6 obras longitudinais aderentes). Para os dois domínios de cálculo, as condições fronteira da grelha modelada foram definidas para extrapolação das condições de transporte sedimentar verificadas nos trechos elementares vizinhos às fronteiras.

O parâmetro considerado para calibração das simulações foi o resultado da projeção da posição da linha de costa num horizonte temporal de 10 anos, permitindo a estimativa de taxas médias de variação da posição da linha de costa. O clima de agitação considerado na calibração correspondeu aos últimos 10 anos de registos da série Histórica (1996 a 2005), produzida no âmbito do projeto MarRisk (2017). O cálculo do transporte sólido longitudinal foi definido de acordo com a fórmula CERC (1984). Para o setor costeiro Barra-Vagueira, o valor do parâmetro de calibração k foi definido igual a 0.0025 e para o setor Figueira da Foz-Leirosa o parâmetro foi definido igual a 0.0030.

Na análise realizada dividiu-se as extensões de linha de costa analisadas em 12 trechos costeiros (Figura 1), permitindo obter a taxa média de variação da posição da linha de costa por cada trecho costeiro. Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos, verificando-se que para o setor Barra-Vagueira a maioria dos trechos apresenta taxas de recuo da ordem de 3 m/ano e no setor Figueira da Foz-Leirosa os recuos médios são de aproximadamente 2 m/ano.



Tabela 1. Recuo médio da posição da linha de costa (m/ano), nos trechos Barra-Vagueira e Figueira da Foz-Leirosa, ao fim de 10 anos de simulação.

Sector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Barra-Vagueira	0.59	2.82	3.18	0.48	2.34	3.66	3.32	3.39	3.18	1.41	2.25	3.63
Figueira da Foz-Leirosa	2.35	2.55	1.32	0.70	-2.44	0.60	2.92	0.36	0.70	2.57	0.20	1.63

Para as duas áreas de estudo, os valores obtidos através de modelação numérica foram confrontados com valores de taxas de erosão propostos em estudos desenvolvidos por diversos autores, permitindo aferir a capacidade do modelo em reproduzir aquela que tem sido a evolução da posição da linha de costa nas áreas de estudo. No setor Barra-Vagueira o recuo médio global obtido através do modelo numérico foi de 2.52 m/ano. Veloso-Gomes *et al.* (2006) indicam que entre 1980 e 1990 as taxas de recuo da posição da linha de costa na Costa Nova e na Vagueira foram estimadas em 3.7 e 3.9 m/ano, respetivamente. Lira *et al.* (2016) referem que nos últimos 50 anos o sector em análise atingiu taxas de recuo da ordem de 8 m/ano, com recuos médios na globalidade do sector Barra-Vagueira na ordem dos 3.74 m/ano. No setor Figueira da Foz-Leirosa o recuo médio global da posição da linha de costa obtido para o período de calibração do modelo foi de 1.10 m/ano. Lira *et al.* (2016) indicam que nos últimos 50 anos o sector Figueira da Foz-Leirosa atingiu taxas de recuo da ordem de 3.7 m/ano, com recuos médios na globalidade próximos de 1.27 m/ano. Verificam-se algumas discrepâncias entre os valores obtidos numericamente e os valores observados, próprias deste tipo de modelação, devido a simplificações relacionadas com os pressupostos de modelação, dificuldade em reproduzir as ações naturais observadas, incluir as ações antropogénicas ao longo do tempo, etc. No entanto, considera-se que a comparação dos resultados do modelo numérico com os valores de levantamentos é satisfatória e o modelo é capaz de reproduzir genericamente aquela que tem sido a evolução dos setores costeiros em análise.

A validação dos *setups* de modelação foi realizada através da simulação da evolução da posição da linha de costa, incorporando nos domínios de cálculo as intervenções de alimentação artificial realizadas nos últimos anos, nas áreas de estudo. Com base na análise dos dados disponibilizados em Pinto *et al.* (2018; 2020), para o setor Barra-Vagueira considerou-se as intervenções realizadas no período de 2008 a 2017 (7 intervenções, correspondendo a um volume total adicionado ao sistema costeiro de aproximadamente 4.29×10^6 m³) e para o setor Figueira da Foz-Leirosa considerou-se as intervenções realizadas entre 2009 a 2017 (4 intervenções, correspondendo a um volume total adicionado ao sistema costeiro de aproximadamente 0.47×10^6 m³). A escolha destes períodos temporais deveu-se ao facto de se ter concluído que correspondem aos anos em que as intervenções se tornaram mais frequentes nas áreas de estudo. O local de deposição dos sedimentos, o momento de intervenção e os volumes considerados nas alimentações foram definidos com base na informação disponibilizada por Pinto *et al.* (2018; 2020).

A introdução das intervenções de alimentação artificial no modelo reduz as taxas de recuo da posição da linha de costa, passando o recuo médio global no setor Barra-Vagueira a situar-se na ordem de 1.89 m/ano (era de 2.52 m/ano) e no setor Figueira da Foz-Leirosa o recuo médio global passa para 0.89 m/ano (era de 1.10 m/ano). Estes resultados mostram que o modelo é sensível às intervenções de alimentação, estando a diminuição do recuo da posição da linha de costa no setor Barra-Vagueira de acordo com o estudo apresentado por Fernández-Fernández *et al.* (2019). No setor Figueira da Foz, a introdução das alimentações artificiais no domínio de cálculo reproduz tendências semelhantes à evolução descrita por Bernardes *et al.* (2020) para a área de estudo, que indica que mesmo com as operações de alimentação artificial os trechos imediatamente a Sul dos esporões da Cova Gala registam recuo da posição da linha de costa.

Resultados

Os resultados obtidos para a evolução natural da posição da linha de costa (cenário de referência), isto é, mantendo as obras existentes e não acrescentando mais nenhuma intervenção costeira, mostram que nos próximos 30 anos e nos dois setores costeiros em análise, se não forem adotadas medidas para mitigar a erosão costeira, a linha de costa continuará a recuar, representando uma perda de território superior a 40 ha no setor Barra-Vagueira e 42 ha no setor Figueira da Foz-Leirosa (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 2. Resultados da simulação numérica da evolução da posição da linha de costa, para o cenário de referência.

	Barra-Vagueira			Figueira da Foz-Leirosa		
	10 anos	20 anos	30 anos	10 anos	20 anos	30 anos
Área perdida (m ²)	270 482	347 114	401 703	145 166	305 747	426 650
Recuo médio (m)	22.54	28.93	33.48	11.52	24.27	33.86
Recuo médio anual (m/ano)	2.25	1.45	1.12	1.15	1.21	1.13

Para os dois sectores em estudo, verifica-se que as manchas de erosão têm maior importância nas zonas imediatamente a sul das obras existentes (Figura 3) e têm tendência a aumentar ao longo do tempo. Entre a Barra e a Costa Nova, o máximo recuo da posição da linha de costa é de 125 metros, a Sul do esporão 5 da Costa Nova é de 97 metros e a Sul da Vagueira é de 68 metros. Entre a Figueira da Foz e a Costa de Lavos, o máximo recuo da posição da linha de costa é de 150 metros, entre a Costa de Lavos e a Leirosa é de 125 metros e a Sul da Leirosa é de 91 metros.



Figura 4. Posição da linha de costa em 2050, no cenário de referência: a) Barra-Vagueira; b) Figueira da Foz-Leirosa.

Constata-se que as intervenções de dragagem e deposição e os sistemas de transposição contínua permitem mitigar a erosão costeira, reduzindo o recuo da linha de costa. Na Tabela 3 apresentam-se os resultados da percentagem de área de território não perdida devida às intervenções, ao fim de 30 anos de simulação, para todos os cenários avaliados. Para os dois tipos de intervenção analisados e para os dois setores costeiros, os cenários correspondentes aos maiores volumes de sedimentos depositados correspondem às soluções com melhor desempenho na perspetiva de mitigar os problemas de erosão a sotamar dos portos de Aveiro e da Figueira da Foz.



Tabela 3. Percentagem de área de território não perdida ao fim de 30 anos de simulação, em cada uma das embocaduras, para os diferentes cenários avaliados.

Dragagem e deposição		Aveiro		Figueira			
Volume (m ³ /ano)	1x10 ⁵	2	3	Volume (m ³ /ano)	1x10 ⁵	4	6
	3x10 ⁵	15	13		3x10 ⁵	20	24
	5x10 ⁵	21	52		5x10 ⁵	42	78
	7x10 ⁵	47	100		7x10 ⁵	74	100
Local de deposição (ver Figura 1)	NCB	28	37	Local da saída (ver Figura 1)	NCB	49	100
	CB	21	52		CB	42	78
	SCB	23	70		SCB	37	100
	Ext.S	30	73		Ext.S	46	100
Frequência	2.5x10 ⁵ de ½ em ½ ano	13	52	Número de saídas	CB+NCB	28	49
	5x10 ⁵ por ano	21	52		CB	42	78
	1x10 ⁶ a cada 2 anos	31	57		CB+SCB	27	100
	2x10 ⁶ a cada 4 anos	29	59		CB+Ext.S	31	100

Genericamente, os resultados indicam que os melhores desempenhos são obtidos com recurso ao sistema de transposição contínua, em vez da deposição de sedimentos em momentos discretos no tempo. Em Aveiro nenhum dos cenários avaliados elimina na totalidade as áreas erodidas no trecho. Na Figueira da Foz os testes de transposição contínua, por *by-pass*, mostram que é possível anular o efeito erosivo que se regista entre a Figueira da Foz e a Leirosa, potenciando um processo reversivo dessa erosão.

Nas Figuras 5 a 8 apresenta-se a evolução do impacto que as diferentes soluções de transposição avaliadas provocam, em termos de área de território não perdida, em cada setor costeiro. Quer para o setor Barra-Vagueira, quer para o setor Figueira da Foz-Leirosa, verifica-se que o impacto das intervenções é crescente no tempo, sendo os maiores impactos obtidos para os cenários que consideram maiores volumes de sedimentos depositados/transpostos.

No setor Barra-Vagueira verifica-se que a área de estudo apresenta maiores benefícios se os sedimentos forem depositados ou transpostos para as localizações definidas como NCB e Ext.S, correspondendo às localizações mais extremas entre as localizações avaliadas (Figura 5b e Figura 6b). Quando se analisa a frequência das operações, os resultados apontam para que seja mais eficaz realizar menos operações, com volumes maiores (Figura 5c). Da mesma forma, nos cenários de transposição, verifica-se que o número de saídas do sistema de transposição condiciona o desempenho da solução, sendo preferível transferir o volume total de sedimentos apenas por uma saída, por oposição à divisão do volume total transposto dividido por duas saídas (Figura 6c).

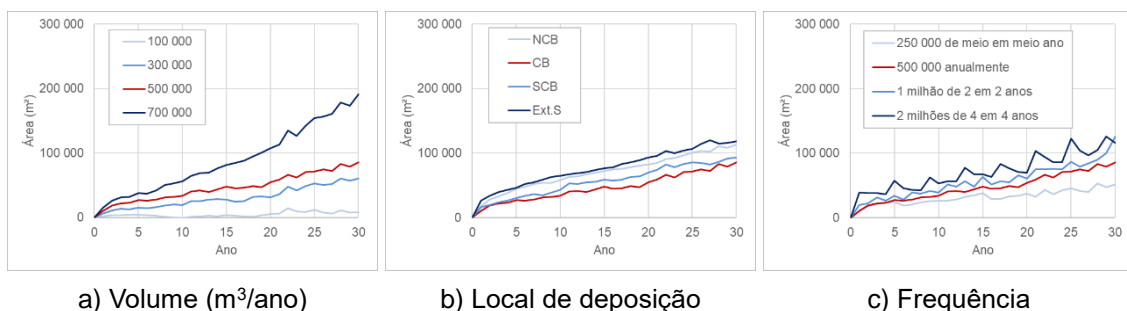
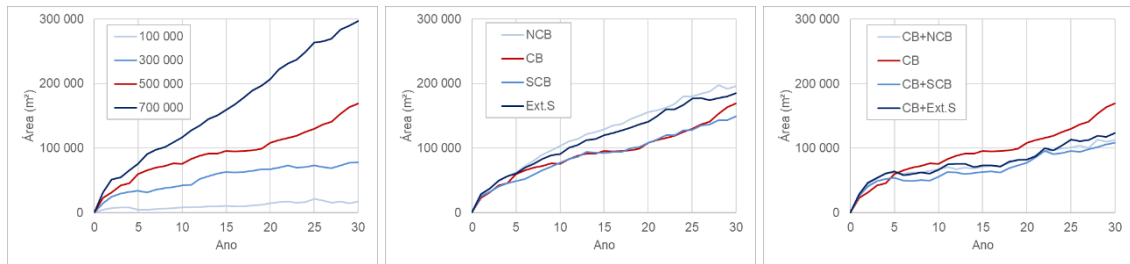


Figura 5. Evolução da área de território não perdida no setor Barra-Vagueira, para os cenários que avaliaram os impactos das alimentações artificiais na evolução da posição da linha de costa.



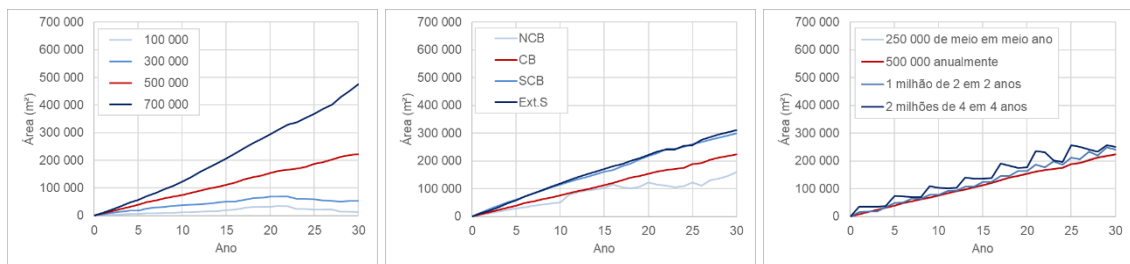
a) Volume (m³/ano)

b) Localização da saída

c) Número de saídas

Figura 6. Evolução da área de território não perdida no setor Barra-Vagueira, para os cenários que avaliaram os impactos dos sistemas *by-pass* na evolução da posição da linha de costa.

Para a embocadura do rio Mondego a deposição dos sedimentos nas zonas mais a Sul do setor costeiro (a sul do campo de esporões da Cova Gala) são os locais que apresentam melhores desempenhos (Figura 7b e Figura 8b). Nos cenários de dragagem e deposição, quando se analisa a frequência das operações, os resultados apontam para que não haja muitas diferenças de desempenho entre realizar operações de baixa magnitude em intervalos de tempo curtos, ou intervenções de grande magnitude, com maiores intervalos de tempo entre intervenções (Figura 7c). Dos cenários de transposição, os resultados indicam que poderão ser retirados maiores benefícios se o volume a transpor for dividido por duas saídas (Figura 8c).

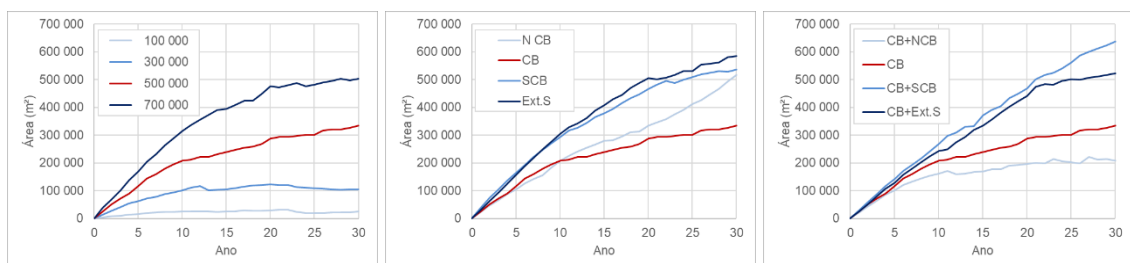


a) Volume (m³/ano)

b) Local de deposição

c) Frequência

Figura 7. Evolução da área de território não perdida no setor Figueira da Foz-Leirosa, para os cenários que avaliaram os impactos das alimentações artificiais na evolução da posição da linha de costa.



a) Volume (m³/ano)

b) Localização da saída

c) Número de saídas

Figura 8. Evolução da área de território não perdida no setor Figueira da Foz-Leirosa, para os cenários que avaliaram os impactos dos sistemas *by-pass* na evolução da posição da linha de costa.



Conclusões

A conceção e a eficácia do sistema de transposição artificial dependem da definição do local ou locais de deposição dos sedimentos e do volume de sedimentos que se pretende transpor. Por um lado, a deposição deve ocorrer o mais perto possível da embocadura, reduzindo os custos associados ao transporte, seja ele realizado através de uma estrutura fixa ou através de operações de dragagem e deposição. No entanto, o ponto principal de deposição também se deve localizar fora da zona de influência fisiográfica imediata da embocadura, num local em que o material transposto não retorne à embocadura por efeito de processos de recirculação devido à difração e refração das ondas, seguindo o seu caminho para sotamar.

O estudo desenvolvido para avaliar a melhor forma de deposição de sedimentos no sentido de mitigar os problemas de erosão que se fazem sentir a sul dos molhes portuários avaliou um total de 20 cenários (10 de transposição contínua e 10 de operações de dragagem e deposição), para cada uma das embocaduras em estudo, permitindo tecer considerações sobre os volumes adotados em cada intervenção de deposição, a frequência das operações e o local de depósito dos sedimentos. Todos os resultados de modelação são dependentes dos pressupostos dos próprios modelos, das simplificações inerentes a projeções de comportamentos de médio/longo prazo e da incerteza associada à caracterização de ações futuras. Contudo, os resultados do processo de calibração e validação dos modelos numéricos, bem como as análises de sensibilidade realizadas a parâmetros relacionados com o efeito da sazonalidade da agitação marítima, profundidade de deposição dos sedimentos das alimentações artificiais, coeficiente empírico da fórmula CERC (k) e período de funcionamento do sistema de transposição, descritas em Coelho *et al.* (2021a,b), permitem ter confiança nos resultados obtidos, possibilitando a análise comparativa do desempenho das soluções de transposição avaliadas na evolução da posição da linha de costa.

Os resultados indicam que os melhores desempenhos são obtidos com recurso ao sistema de transposição contínua, em vez da deposição de sedimentos em momentos discretos no tempo. Em Aveiro, entre os cenários avaliados, nenhum cenário elimina na totalidade as áreas erodidas no trecho, sendo a solução mais eficaz entre os cenários testados, a transposição contínua de 700 000 m³/ano de sedimentos. Na Figueira da Foz, ao fim de 30 anos de simulação, o cenário com volume de sedimentos depositado ou transposto de 700 000 m³/ano conduz a ganhos de área, beneficiando a situação presente no trecho costeiro. A transposição contínua de 500 000 m³/ano de sedimentos também permite eliminar as áreas erodidas no trecho, em função da localização e número de saídas consideradas.

Face às conclusões expostas, verifica-se que as soluções de transposição avaliadas apresentam melhores desempenhos no setor Figueira da Foz-Leirosa. Esta diferença é atribuída em parte à diferença do saldo do caudal sedimentar longilitoral, estimada superior em Aveiro, por comparação com o valor obtido na Figueira da Foz. Com base na simulação numérica da propagação da agitação marítima, estimou-se que o caudal sedimentar longilitoral potencial líquido em Aveiro é cerca de 996 000 m³/ano, e na Figueira da Foz é de cerca de 746 000 m³/ano, ambos dirigidos de Norte para Sul.

Referências Bibliográficas

- Antunes, C. (2019). "Assessment of Sea level Rise at West Coast of Portugal Mainland and Its Projection for the 21st Century". *Journal of Marine Science and Engineering*, doi: 10.3390.
- Bernardes, C., Fernandez, S., Santos, F., Baptista, P., Silva, P., Abreu, T., Coelho, C., Lima, M., Carvalho, R. (2020). "Estudo de Viabilidade de Transposição Aluvionar das Barras de Aveiro e da Figueira da Foz - Relatório Intercalar 1: Figueira da Foz". Consórcio UA/R5, 55 p.
- CERC 1984. *Shore Protection Manual*. Vol. 1. DC: U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering and Research Center. U.S. Government Printing Office.
- Coelho, C., Ferreira, M., Silva, P. A., Bernardes, C., Santos, F., Baptista, P., Lima, M., Carvalho, R. (2021a). "Estudo de Viabilidade de Transposição Aluvionar das Barras de Aveiro e da Figueira da Foz, Relatório Intercalar 2: Aveiro - Tarefa 4". Consórcio UA/R5, 91 p.



- Coelho, C., Ferreira, M., Silva, P. A., Bernardes, C., Santos, F., Baptista, P., Lima, M., Carvalho, R. (2021b). "Estudo de Viabilidade de Transposição Aluvionar das Barras de Aveiro e da Figueira da Foz, Relatório Intercalar 2: Figueira da Foz - Tarefa 4". Consórcio UA/R5, 86 p.
- Coelho, C. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira". Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 p.
- COSMO (2018). "Modelo Digital de Elevação (DEM) da praia imersa e emersa entre a Praia de São Jacinto à Praia da Gafanha da Boa Hora". Código: 8cd53865-0706-ebf6-5734-7b5cab3becc6. Geoglobal, Sistemas de Informação Geográfica, Lda. Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental: COSMO, APA - Agência Portuguesa do Ambiente (<https://cosmo.apambiente.pt/>).
- EEA (2019). "European Environment Agency. Projected Rise in Global Mean Sea Level" <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/projected-global-mean-sea-level#tab-dashboard-01> (visitado em julho de 2020)
- Ferreira, M., Fernández-Fernández, S., Coelho, C., Silva, P. A. (2021); "Caracterização de Tempestades e da Deriva Litoral no Litoral de Aveiro, em Cenários de Alterações Climáticas", XV Congresso da Água, Lisboa, Portugal.
- Fernández-Fernández, S., Baptista, P., Bernardes, C., Silva, P., Fontán-Bouzas, Á., López-Olmedilla, L., Ferreira, C. (2019). "Variação da Linha de Costa em Praias Arenosas: Aveiro (Portugal)". IX Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Lisboa, Portugal.
- Google Earth 2021. Visitado em dezembro de 2021.
- Lira, C., Silva, A., Taborda, R., Andrade, C. (2016). Coastline Evolution of Portuguese Low-Lying Sandy Coast in the Last 50 years: an integrated approach. *Earth System Science Data Discussions* 8 (1), 265-278. doi:10.5194/essd-2016-5.
- MarRisk (2017). "Adaptação Costeira às Alterações Climáticas: conhecer os riscos e aumentar a resiliência". Projeto de investigação financiado através do programa EP-INTERREG V Espanha-Portugal (POCTEP).
- Mil-Homens, J.; Ranasinghe, R.; van Thiel de Vries, J. S. M., and Stive, M. J. F. (2013). "Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas". *Coastal Engineering*, 75, 29–39. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.01.004
- Pinto, C.A.; Penacho, N.; Pires, B. (2021). "Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental (COSMO): Da Conceção à Implementação". In X Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa; Janeiro, R., Ed.; APRH: Lisboa, Portugal; 3p.
- Pinto, C.A.; Silveira, T.M.; Teixeira, S.B. (2020). "Beach nourishment practice in mainland Portugal (1950-2017): Overview and retrospective". *Ocean. Coast. Manag.*, 192, 105211
- Pinto, C., Silveira, T., Teixeira, S. (2018). "Alimentação Artificial de Praias na Faixa Costeira de Portugal Continental: Enquadramento e Retrospectivas das Intervenções Realizadas (1950-2017)". Relatório Técnico. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R. (2014). "Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança". Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, 237 p.
- Tolman, H. L., 2009: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- Veloso-Gomes, F., Taveira Pinto, F., Das Neves, L., Pais Barbosa, J. (2006). "Pilot site of River Douro – Cape Mondego, and case studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale de Lobo and Azores. EUrosion". IHRH, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ISBN: 972 752 074-x.