



ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO NO TRECHO COSTEIRO DO FURADOURO

Francisco Sancho¹; Alphonse Nahon¹; Ana Rilo¹; Filipa S.B.F. Oliveira¹; Bruno Pires²; Celso Aleixo Pinto²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil

² Agência Portuguesa do Ambiente

fsancho@lnec.pt, anahon@lnec.pt, arilo@lnec.pt, foliveira@lnec.pt, bruno.pires@apambiente.pt,
celso.pinto@apambiente.pt

Resumo

Este trabalho apresenta uma síntese do estudo de modelação numérica da evolução da linha de costa e da avaliação do galgamento oceânico para o trecho costeiro do Furadouro, realizado para a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA). Comparam-se quatro alternativas de intervenção envolvendo a manutenção das obras costeiras existentes e/ou a construção de um quebra-mar destacado, com ou sem uma alimentação artificial de grande magnitude.

Introdução

O trecho costeiro entre a foz do Douro e o cabo Mondego apresenta elevado desequilíbrio morfológico, com acentuados processos erosivos a sul de Espinho e da embocadura da Ria de Aveiro (Vicente e Clímaco, 2012, 2014). Estes autores quantificaram os volumes de erosão e apresentaram estimativas dos balanços aluvionares neste litoral, para vários períodos; p.ex., para o período entre 1997 e 2005 (8 anos), estimaram uma perda sedimentar global de cerca de 9×10^6 m³ entre a foz do Douro e a Torreira, ou seja, um pouco mais de 1×10^6 m³ por ano.

Para mitigar esta tendência erosiva e proteger várias povoações litorais, um vasto conjunto de obras de defesa costeira foi construído entre a foz do Douro e a barra de Aveiro desde meados do século XX. Destacam-se as obras em Espinho, Silvalde, Paramos, Esmoriz, Cortegaça, Furadouro e Torreira. No Furadouro (Figura 1a), existem atualmente 2 esporões e 3 estruturas de defesa aderente, tendo-se verificado nas últimas décadas uma crescente ocorrência de galgamentos com elevada magnitude (Martins, 2016). Além da vulnerabilidade ao galgamento costeiro, sendo as obras de defesa frontal muito refletoras, estas limitam a retenção de areias nas praias entre esporões.

Face à natural degradação dos esporões e defesa aderente no Furadouro ocorrida desde a última intervenção (em 2014, segundo Lima *et al.*, 2021), a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) deu início à reparação destas obras em fevereiro de 2025. Adicionalmente, está ainda a planear novas intervenções de defesa costeira no setor entre Esmoriz e Furadouro, as quais poderão envolver a manutenção das obras existentes e/ou a construção de um quebra-mar destacado (QMD), com ou sem alimentação artificial (AA) de grande magnitude. Para poder decidir sobre as intervenções mais adequadas efetuou-se um estudo de modelação da evolução da linha de costa e do galgamento oceânico (Sancho *et al.*, 2024), do qual se apresentam aqui os principais resultados.

Cenários de intervenção

Contemplaram-se quatro cenários de intervenção: A) manutenção da situação atual; B) execução de uma AA totalizando 4×10^6 m³; C) construção de um QMD em 3 posições alternativas em frente ao Furadouro; e D) execução conjunta da AA e do QMD (conjugação de A e C).

Relativamente à AA, consideraram-se 3 zonas de deposição: B1 – na praia imersa entre as batimétricas –4 m (ZH) e –8 m (ZH), ao longo de um comprimento de 2 km (1500 m para norte do esporão da Maceda e 500 m para sul do esporão da Maceda), com o volume de 1×10^6 m³; B2 – na praia emersa, com os volumes de $0,9 \times 10^6$ m³ no troço entre o esporão norte de Esmoriz e o esporão da Maceda e de $1,1 \times 10^6$ m³ no troço com 1,5 km de extensão a sul do esporão da Maceda; B3 – na praia emersa, no troço entre a secção 700 m a norte do esporão norte do Furadouro e o esporão sul do Furadouro, numa extensão de 1250 m, com o volume de 1×10^6 m³.

Considerou-se como ponto de partida para o cenário C os resultados dos trabalhos efetuados pela WW Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A., simulando-se um QMD com 200 m de comprimento, distanciados 350 m da linha de costa. Testaram-se as 3 localizações do QMD esquematizadas na Figura 1b-d.



Figura 1. (a) Vista geral das obras costeiras no Furadouro; (b-d) localizações dos quebra-mares destacados ensaiados no Furadouro (cenários C1, C2 e C3)

Evolução morfológica recente do trecho costeiro do Furadouro

A análise da evolução morfológica do troço costeiro compreendido entre a praia de Cortegaça e a praia do Torrão do Lameiro foi feita pela comparação da posição da linha de costa em diferentes datas, conseguida através da análise dos ortofotos georreferenciados fornecidos pelo Programa COSMO da APA, entre 2018 e 2021. A comparação da posição das diferentes linhas de costa e respetivos cálculos de taxas de variação foi efetuada usando o software DSAS – Digital Shoreline Analysis System (versão 6.0) (Himmelstoss *et al.*, 2024).

Na Figura 2 mostra-se a taxa de evolução da linha de costa entre 2018 e 2021, no troço Esmoriz-Cortegaça e Torrão do Lameiro. Nos trechos ocupados na totalidade por estruturas de proteção costeiras, considerou-se não haver evolução. Observou-se uma tendência de recuo generalizado no trecho compreendido entre Esmoriz-Cortegaça e Furadouro, com valores máximos de -13 m/ano a sul da praia de São Pedro de Maceda. O trecho Furadouro – Torrão do Lameiro apresenta valores de recuo e progradação máximos de $-4,25$ m/ano e $+2,73$ m/ano, respetivamente, mostrando uma tendência geral de estabilidade, embora com ligeiro recuo.

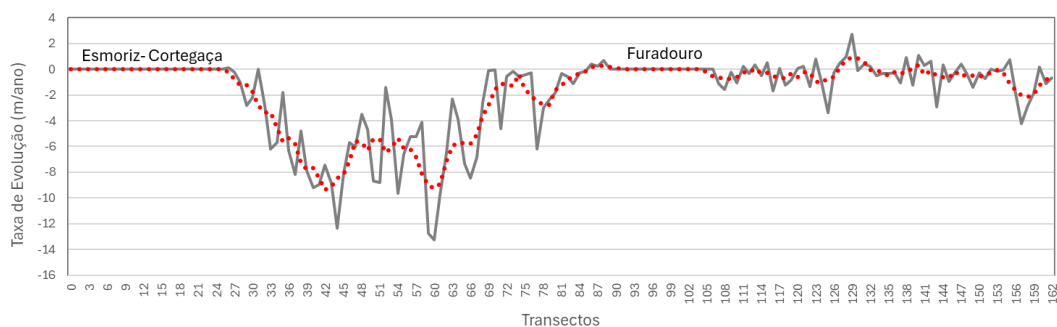


Figura 2. Taxa de evolução da posição da linha de costa no trecho entre Esmoriz/Cortegaça e a Praia do Torrão do Lameiro, entre 2018 e 2021 (assinala-se a vermelho a linha de tendência obtida através de uma média móvel de 5 pontos)



A análise de levantamentos topográficos e topo-hidrográficos do Programa COSMO permitiu também determinar que: i) na praia emersa entre Cortegaça e o Furadouro, acima da cota +3,6 m (ZH), ocorreu erosão da ordem de $260 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$, entre setembro de 2018 e abril de 2021; ii) no mesmo troço, em 22 meses (2018-09 e 2020-07), a perda de areia na parte emersa foi acompanhada por erosão na região submersa, com perda global (nas duas partes) de $1,5 \times 10^3 \text{ m}^3$; iii) estas erosões são também observadas nos dados de perfis transversais na Praia de São Pedro de Maceda, com um recuo da escarpa dunar de 20 m, em 2 anos.

Modelação numérica da evolução da linha de costa

Para o estudo da evolução da linha de costa nos vários cenários de intervenção, aplicou-se o modelo LITMOD (e.g., Vicente e Clímaco, 2014), já aplicado a um apreciável número de estudos e calibrado anteriormente para este litoral. Para tal, consideraram-se as condições de simulação e de calibração determinadas por Vicente e Clímaco (2014). A calibração do modelo atendeu aos caudais sólidos nas fronteiras norte (de entrada) e sul (de saída), respetivamente de $200.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ e $1.300.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, estimados para o período de 1997 a 2005. Estes valores foram considerados também válidos para as presentes simulações, atendendo ao facto de não ter ocorrido alteração significativa das obras que controlam os fluxos aluvionares a norte e do regime de agitação marítima. No presente caso, atendendo a que o ano compreendido entre 01/08/2005 e 31/7/2006 apresenta uma capacidade de transporte próxima da média geral da série cronológica, constituiu-se uma série cronológica de 20 anos consistindo na repetição da série daquele ano. Para as simulações com AA teve-se em consideração que o sedimento será proveniente de uma mancha de empréstimo ao largo, identificada pela APA no âmbito do projeto CHIMERA, caracterizada por $d_{50}=0,84 \text{ mm}$, superior à dimensão característica dos sedimentos no atual trecho costeiro, $d_{50}=0,30 \text{ mm}$. Outros detalhes da implementação do modelo estão descritos em Sancho *et al.* (2024).

Os resultados da modelação da evolução da linha de costa mostram que, na ausência de qualquer intervenção – cenário A –, verificar-se-á acentuada erosão desde o esporão da Maceda até ao Furadouro e desde o esporão sul do Furadouro até cerca de 2 km a norte da Torreira. Os restantes troços manter-se-ão estáveis, incluindo a frente do Furadouro, entre esporões.

A intervenção segundo o cenário B conduzirá a um acréscimo temporário (entre 40 a 50 m) da largura de praia na frente e imediatamente a norte do Furadouro. A longevidade expectável desta alimentação artificial é da ordem de 4 a 7 anos.

Alternativamente, a opção pelo cenário C tem efeitos semelhantes aos do cenário B para posições do QMD mais a sul (C1) e intermédia (C3), no respeitante à evolução da linha de costa a longo prazo. Somente para a posição mais a norte (C2) ocorreria um considerável ganho na largura de praia a norte do Furadouro, mas com significativo agravamento da erosão a sul daquela povoação, transferindo o *hot-spot* erosivo da Praia de São Pedro de Maceda para a Praia da Marreta. Verificou-se também que a localização do quebra-mar tem notório impacto na evolução da linha de água em redor do Furadouro: o cenário C2 promove maior retenção sedimentar para norte do Furadouro; o cenário C1 promove uma resposta da linha de costa muito semelhante à do cenário A, unicamente com pequeno impacto positivo na região diretamente protegida pela obra (ganho de largura de praia da ordem de 20-30 m); o cenário C3 conduz a uma evolução da linha de costa intermédia entre os C1 e C2, mas sem ganhos na praia encaixada do Furadouro.

A opção pelo cenário D conduzirá a ganhos consideráveis da largura de praia a norte do Furadouro e maiores perdas a sul, para qualquer posição do QMD. No entanto, do ponto de vista de balanço sedimentar acumulado na célula litoral entre Esmoriz e a Praia do Torrão do Lameiro, o desempenho da solução combinada é muito semelhante ao de se executar apenas a AA.

Modelação numérica do galgamento costeiro

Com o objetivo de avaliar o desempenho das intervenções relativamente à mitigação do galgamento oceânico, aplicou-se o modelo numérico de propagação de ondas em condições de



tempestade XBeach. Foram consideradas seis morfologias do fundo, considerando a (idealizada) evolução no tempo, a magnitude da AA inicial, além das diferentes localizações do QMD. A batimetria de referência do domínio computacional foi definida como a média dos modelos digitais de terreno do Programa COSMO dos anos 2018, 2019 e 2020. Definiram-se 5 condições de agitação marítima e de nível de água, a partir de uma base de dados com as ocorrências de níveis de preia-mar e de altura significativa de onda. Das simulações extraíram-se mapas de inundação e um *proxy* do caudal galgado. O modelo foi calibrado com base no evento registado no dia 17/11/2018, do qual se dispunham de registos fotográficos de galgamentos costeiros.

Os resultados do modelo obtidos para os vários cenários de intervenção permitiram concluir: i) o cenário B oferece boas condições de proteção ao galgamento e inundação costeira enquanto o acréscimo da largura de praia for superior a 20 m; ii) no cenário B, o aumento local da largura de praia é proporcional à redução dos caudais galgados e da exposição à inundação; iii) no cenário C, para a maioria das condições de agitação marítima e nível de água consideradas, a opção pela construção de um QMD é menos benéfica que a do alargamento da praia por AA.

Observou-se ainda que, em determinadas condições, devido à possível reflexão de ondas longas pelo QMD, associadas aos eventos de agitação com maiores períodos de pico, poderão verificar-se aumentos apreciáveis da exposição ao galgamento com a construção de um QMD.

Conclusões e recomendações

Os resultados indicaram não haver aparentes vantagens na execução de um quebra-mar destacado face à execução de uma alimentação artificial de elevada magnitude (admitindo que se venha a repetir com alguma regularidade). A opção entre uma solução ou outra deve, naturalmente, considerar outras dimensões como os impactes ambientais, a análise económica ou custo-benefício de cada solução, a exequibilidade e custos de realização de operações de manutenção, entre outras.

Recomenda-se assim, na ausência de informação adicional e de uma análise comparativa entre soluções abrangendo outros fatores, que, para atingir os objetivos preconizados, seja realizada a operação de alimentação artificial em detrimento da construção de um QMD. Esta ação deverá ser acompanhada por monitorização da evolução morfológica e da longevidade da intervenção, por forma a adquirir conhecimento sobre o comportamento deste trecho litoral face a este tipo de intervenções.

Referências Bibliográficas

- COSMO, <https://cosmo.apambiente.pt>, acessado em 2025-08-21.
- Himmelstoss, E.A., *et al.* (2024). "Digital Shoreline Analysis System, version 6.0". U.S. Geological Survey software release, <https://doi.org/10.5066/P13WIZ8M>.
- Lima, M., Coelho, C., Jesus, A., Alves, F., Marto, M. (2021). "Base de Dados #4 - Intervenções de Defesa Costeira - Caso de Estudo (Ovar)". Projeto INCCA - Adaptação Integrada às Alterações Climáticas para Comunidades Resilientes, Universidade de Aveiro.
- Sancho, F. E., Nahon, A., Oliveira, F. S. B. F., Rilo, A. (2024). "Simulação da evolução da linha de costa e do galgamento oceânico para diferentes cenários de intervenção no trecho costeiro do Furadouro". LNEC, Relatório 388/2024 – DHA/NEC.
- Martins (2016). Avaliação da hidrodinâmica e dos níveis de galgamento na praia do Furadouro: análise comparativa da situação atual e com a construção de quebra-mares destacados. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, especialização em Hidráulica, FEUP, 164pp.
- XBeach, <https://xbeach.readthedocs.io/>, acessado em 2025-08-21.
- Vicente, C.M., Clímaco, M. (2012). "Trecho de costa do Douro ao Cabo Mondego: caracterização geral do processo erosivo". LNEC, Relatório 253/2012 – DHA/NEC.
- Vicente, C.M., Clímaco, M. (2014). "Trecho de costa a sul de Espinho: simulação numérica do processo erosivo e de alternativas de intervenção". LNEC, Relatório 101/2014 – DHA/NEC.