



RENATURALIZAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS ATRAVÉS DE ECO-ENGENHARIA: UM MANUAL DE ORIENTAÇÃO

Bárbara Proença¹; Lénia D. Rato¹; Renaat De Sutter¹

¹HAEDES Portugal, Casais do Arrocho, 2025-452 Azóia de Cima, Portugal

barbara.proenca@haedes.eu, lenia.rato@haedes.eu, renaat.desutter@haedes.eu.

Resumo

Nas últimas décadas, a comunidade científica internacional tem vindo a desenvolver e testar métodos inovadores para adaptar infraestruturas costeiras convencionais, visando aumentar a biodiversidade e melhorar o funcionamento dos ecossistemas costeiros e estuarinos. Esta abordagem, conhecida como eco-engenharia e, associada ao conceito *Greening-the-Grey*, tem vindo a ganhar destaque, sendo cada vez mais considerada globalmente por profissionais e decisores políticos.

A eco-engenharia baseia-se na introdução de melhorias ecológicas em infraestruturas rígidas costeiras (como obras de defesa aderente, esporões ou cais portuários) para lhes conferir um valor multifuncional. Estas intervenções mantêm a eficácia estrutural e funcional dos ativos, promovendo simultaneamente benefícios ambientais e sociais. Além disso, incentivam a colaboração entre os proprietários das infraestruturas e os vários intervenientes na gestão dos ecossistemas.

Com este trabalho pretende-se apresentar o guia desenvolvido para a CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), com coordenação da HR Wallingford e contributos de diversas entidades, incluindo a HAEDES, coordenadora dos capítulos referentes à caracterização ecológica dos ambientes costeiros e apresentação das técnicas de eco-engenharia, Royal Haskoning DHV, Green Room Environmental, Universidade de Glasgow e BMT UK Ltd. O seu principal objetivo é demonstrar o valor e impacto das melhorias ecológicas aplicadas a projetos de engenharia costeira rígida, promovendo a sua integração numa estratégia de gestão de ativos eficaz, sustentável e orientada para a biodiversidade.

As técnicas de eco-engenharia são particularmente indicadas em contextos onde soluções baseadas na natureza (como o restauro de dunas, sapais ou recifes) não são viáveis do ponto de vista económico ou social. Este é frequentemente o caso em zonas costeiras urbanizadas, onde o recuo planeado não é politicamente aceite. Nestes locais, as soluções de eco-engenharia representam uma forma prática de “renaturalizar o cinzento”, contribuindo para tornar as infraestruturas mais resilientes, sustentáveis e compatíveis com os objetivos ambientais.

Para além da sua função de proteção costeira, estas técnicas aumentam o valor ecológico das infraestruturas, promovendo serviços essenciais dos ecossistemas. Entre estes contam-se a manutenção da qualidade da água, o sequestro de carbono, o aumento da produtividade pesqueira e a valorização do uso social e recreativo das zonas costeiras.

O guia pretende, assim, servir de recurso prático para proprietários de infraestruturas, engenheiros, decisores políticos e técnicos da área costeira, fornecendo orientações sobre como aplicar estas técnicas, desde a fase de conceção até à monitorização a longo prazo. Baseia-se em investigação científica e na experiência prática de casos reais de aplicação da eco-engenharia, demonstrando os benefícios da integração destes princípios nos projetos costeiros.

Embora o foco principal esteja nas zonas entremarés e submersas do Reino Unido, o documento inclui também exemplos internacionais, sendo os seus princípios potencialmente aplicáveis a outros contextos costeiros semelhantes na Europa e no mundo. O objetivo final é promover uma adoção mais alargada da eco-engenharia, superando barreiras existentes e contribuindo para uma gestão costeira mais sustentável, resiliente e integrada.



Contexto e objetivos

Ao longo dos anos tem-se reconhecido, na gestão e desenvolvimento costeiro, a necessidade de soluções que funcionem em articulação com os sistemas naturais. Por exemplo, estruturas de engenharia convencional usadas para defesa costeira contra fenómenos de erosão ou inundações, revelam limitações face à subida do nível do mar e reduzem os serviços de ecossistema das linhas de costa naturais.

Neste sentido, verifica-se atualmente uma transição para uma tendência de “trabalhar com a natureza”, através de soluções baseadas ou inclusivas da natureza, integradas no planeamento estratégico. Em alguns casos isto envolve realinhamento gerido, recuando defesas costeiras para reduzir custos e implementar soluções sustentáveis de gestão de cheias e erosão. Porém, esta abordagem é muitas vezes inviável em áreas urbanizadas com infraestruturas como muros, quebra-mares ou portos. Ainda assim, estas podem ser melhoradas por exemplo tirando partido de intervenções de reparação, aplicando assim técnicas de melhoria ecológica.

O guia aqui apresentado (Roca et al., 2025) procura colmatar lacunas na orientação e implementação de projetos desta natureza, com os seguintes objetivos:

- Apresentar técnicas de eco-engenharia e aspetos de conceção, baseados em investigação e casos piloto, com foco no Reino Unido.
- Fornecer casos de estudo que evidenciem benefícios, desafios e aprendizagens.
- Criar recomendações para desenvolver aplicações atrativas e financeiramente sustentáveis.
- Disponibilizar conhecimentos básicos sobre processos ambientais e naturais.
- Motivar autoridades e promotores a integrar eco-engenharia em projetos costeiros.

Aspetos ecológicos chave

Na conceção de técnicas de eco-engenharia é essencial compreender conceitos ecológicos e como os ecossistemas costeiros respondem às medidas aplicadas. Estes ambientes, para além de desafiantes, são biodiversos e dinâmicos, podendo estar sujeitos a espécies invasoras ou alterações ambientais.

A introdução de estruturas costeiras provoca vários impactos no ambiente local, tanto do ponto de vista biológico como físico. Sob o aspeto físico, é amplamente reconhecido que a introdução de estruturas de engenharia costeira pode conduzir a alterações significativas no transporte de sedimentos, na hidrodinâmica e nos processos de erosão/assoreamento. As alterações nestes processos têm repercussões nos processos ecológicos que lhes estão associados. Por exemplo, a introdução de um esporão modificará o transporte longitudinal de sedimentos, o campo local de ondas e os locais de deposição sedimentar. Estes processos físicos estão também intimamente ligados à disseminação natural local de organismos marinhos vivos e, por isso, conduzirão a alterações nos processos ecológicos.

Além disso, estas estruturas tendem a criar habitats mais adequados à colonização por espécies oportunistas não nativas do que por espécies nativas. Para contrariar este efeito, as práticas de integração ecológica podem por exemplo incidir na escolha de substratos que apoiem o recrutamento ou o desenvolvimento de espécies nativas formadoras de habitat e de espécies-alvo que, por sua vez, aumentam os impactos positivos nos ecossistemas locais ao facilitar o recrutamento de uma maior biodiversidade de organismos na estrutura costeira.

A resiliência dos habitats e a sua regeneração futura podem ser melhoradas através do aumento das áreas de colonização e da promoção de habitats saudáveis e biodiversos. O conhecimento sobre o habitat das espécies locais e sobre a dinâmica das populações nativas, como dispersão e conectividade, juntamente com processos ecológicos como alimentação, predação, competição e reprodução, contribui para melhorar o design dos projetos e os resultados positivos da implementação das técnicas de eco-engenharia. Ambientes artificiais, como os criados pelas estruturas, têm impactos significativos em alguns destes processos ecológicos-chave.



O design de soluções é frequentemente orientado para espécies-alvo, escolhidas por critérios de conservação, sociais, culturais ou económicos. Exemplos incluem ostras, mexilhões, macroalgas, ervas marinhas e peixes de valor comercial, destacando-se as ostras pelo papel de engenheiras de ecossistema. O esquema apresentado na Figura 1 resume os aspetos ecológicos que são importantes considerar em intervenções de eco-engenharia em estruturas costeiras, de forma a aumentar a sua probabilidade de sucesso.

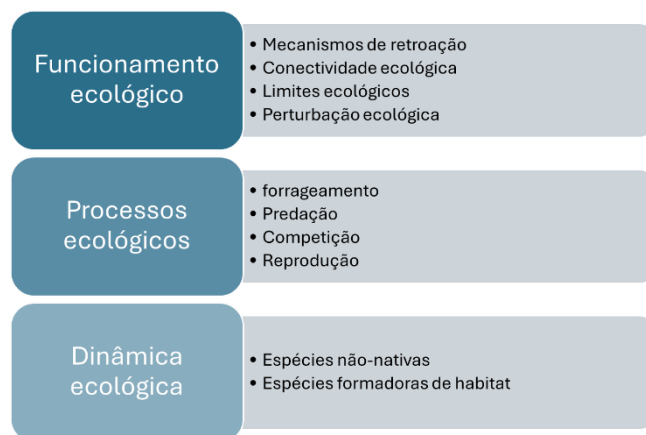


Figura 1. Conceitos ecológicos chave para a aplicação de técnicas de eco-engenharia em ambientes costeiros.

Exemplos de técnicas

A conversão de uma estrutura de engenharia convencional numa estrutura ecologicamente adaptada é normalmente alcançada através da replicação de algumas das funções naturais do ecossistema na infraestrutura, como a provisão de habitat, ou pela preservação da conectividade ecológica do sistema. É importante salientar que as técnicas de inclusão ecológica têm como objetivo recriar habitats quase naturais, tanto quanto possível, e não introduzir habitats novos.

Um dos principais impactos ecológicos das estruturas de engenharia convencionais (para além da sua pegada física) está relacionado com a sua estrutura física desprovida de complexidade. A complexidade do habitat é um conceito que se refere à variedade e à intrincada relação entre as características físicas e biológicas de um determinado ambiente. Esta engloba a diversidade de estruturas, recursos e nichos presentes num ecossistema, que podem incluir elementos como vegetação, topografia, características de retenção de água e a presença de vários organismos. A complexidade física de uma estrutura deve ser maximizada sempre que possível, de forma a aumentar a disponibilidade e a diversidade de habitats (Evans et al. (2015, 2017, 2019).

A reduzida complexidade topográfica de uma superfície artificial é um fator determinante para a sua fraca diversidade ecológica, quando comparadas com os ambientes rochosos naturais de referência que podem substituir (MacArthur et al., 2020). Por exemplo, as estruturas costeiras de engenharia convencional utilizam muitas vezes betão, que geralmente não apresentam complexidades superficiais a microescala (da ordem de mm) e a mesoescala (da ordem de cm ou m) (Coombes et al., 2015; MacArthur et al., 2020).

Um procedimento geral na melhoria das estruturas costeiras de engenharia convencionais consiste em aplicar materiais e configurações compatíveis com o ambiente natural de referência em termos de composição de habitat. Estes são materiais que favorecem a fixação e o crescimento de organismos vivos, fornecem áreas de alimentação para espécies que se nutrem da epibiose e oferecem refúgio a muitos organismos (Firth et al., 2014). A maioria das experiências de melhoria ecológica e das implementações de eco-engenharia realizadas até à data tem-se centrado no aumento da complexidade física do habitat à escala centímetro-metro (Coombes et al., 2015). Como exemplo, as defesas costeiras porosas podem proporcionar habitats vantajosos, apoiando uma maior riqueza e diversidade de espécies do que superfícies lisas externas expostas a forças hidrodinâmicas mais elevadas (Sherrard et al., 2016). Na Figura

2 apresentam-se exemplos de conceitos para a aplicação de técnicas de eco-engenharia.



Figura 2. Exemplos de técnicas de eco-engenharia (naturais e artificiais). a) Superfícies texturizadas; b) estruturas de retenção de água e c) estruturas de passagem e refúgio.

Considerações finais

As evidências reunidas demonstram que a eco-engenharia constitui uma abordagem prática e eficaz para compatibilizar a proteção costeira com a conservação da biodiversidade e a provisão de serviços de ecossistema. Ao replicar funções naturais e aumentar a complexidade física das estruturas, estas soluções permitem transformar ativos convencionais em infraestruturas multifuncionais, resilientes e sustentáveis. Embora persistam desafios relacionados com a sua aplicação em contextos urbanizados e com a necessidade de maior sensibilização dos decisores, os exemplos apresentados confirmam que é possível incluir medidas de melhoria ecológica de forma economicamente viável e ambientalmente benéfica. Assim, a eco-engenharia deve ser encarada não apenas como uma alternativa, mas como uma componente essencial da gestão costeira integrada, com elevado potencial de replicação em diferentes contextos geográficos.

Referências Bibliográficas

- Coombes, M.A., La Marca, E.C., Naylor, L.A., Thompson, R.C. (2015). "Getting into the groove: Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures". *Ecol. Eng.* 77, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.032>
- Evans, A. J., Firth, L. B., Hawkins, S. J., Hall, A. E., Ironside, J. E., Thompson, R. C., et al. (2019). "From ocean sprawl to blue-green infrastructure—A UK perspective on an issue of global significance". *Environ. Sci. Policy* 91, 60–69. doi: 10.1016/S0065-2504(03)33011-9
- Evans, A.J., Firth, L.B., Hawkins, S.J., Morris, E.S., Goudge, H. and Moore, P.J., (2015). "Drill-cored rock pools: an effective method of ecological enhancement on artificial structures". *Marine and Freshwater Research*, 67, 123-130
- Evans, A. J., Garrod, B., Firth, L. B., Hawkins, S. J., Morris-Webb, E. S., Goudge, H., et al. (2017). "Stakeholder priorities for multi-functional coastal defence developments and steps to effective implementation". *Mar. Policy* 75, 143–155. doi: 10.1016/j.marpol.2016.10.006
- Firth, L.B., Schofield, M., White, F.J., Skov, M.W. and Hawkins, S.J. (2014). "Biodiversity in intertidal rock pools: Informing engineering criteria for artificial habitat enhancement in the built environment". *Marine Environmental Research*. Volume 102, pp. 122-130.
- MacArthur, M., Naylor, L.A., Hansom, J.D., Burrows, M.T., (2020). "Ecological enhancement of coastal engineering structures: Passive enhancement techniques". *Sci. Total Environ.* 740, 139981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139981>
- Roca, M, Heredge, J, Proença, B, Rato, L D, De Sutter, R, Hick, E, Flikweert, J, Challinor, S, Naylor, LA, Matthewson, T (2025). "Greening coastal infrastructure through eco-engineering", C820, CIRIA, London, UK (ISBN: 978-0-86017-967-2)
- Sherrard, T.R.W., Hawkins, S.J., Barfield, P., Kitou, M., Bray, S., Osborne, P.E. (2016). "Hidden biodiversity in cryptic habitats provided by porous coastal defence structures". *Coast. Eng.* 118, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.005>