

O PAPEL DA TECNOLOGIA NO APOIO AO ECOSISTEMA MARITIMO

Otávio Augusto de Souza Bustamante¹; José Arnaldo Gonçalves da Silva²; Bernardo de Viveiros Martins³; Sérgio Sobral Sena⁴; Marcio Carvalho Moreira de Souza Junior⁵; Claudia Simões Pinto da Cunha Lima⁶; Morjane Armstrong Santos de Miranda⁷.

¹Otávio Bustamante; Graduando em Engenharia Civil; Centro Universitário SENAICIMATEC; otavio.lourenco@aln.senaicimatec.edu.br

²José Arnaldo; Graduando em Engenharia Computação; Centro Universitário SENAICIMATEC; jose.a.silva@aln.senaicimatec.edu.br

³Bernardo Martins; Graduando Engenharia Civil; Centro Universitário SENAI CIMATEC;bernardo.martins@aln.senaicimatec.edu.br

⁴Sérgio Sobral; Graduando em Engenharia da Computação; Centro Universitário SENAICIMATEC; sergio.sena@aln.senaicimatec.edu.br

⁵Marcio Carvalho; Graduando em Engenharia Civil; Centro Universitário SENAI CIMATEC; marcio.junior@aln.senaicimatec.edu.br

⁶Claudia Simões Pinto da Cunha Lima; Doutora em Modelagem Computacional; Centro Universitário SENAI CIMATEC; claudia.lima@fieb.org.br

⁷Morjane Armstrong Santos de Miranda; Doutora em Administração; Centro Universitário SENAI CIMATEC; morjanessa@gmail.com

RESUMO

A perda de corais é uma preocupação crescente devido ao papel vital nos ecossistemas marinhos. Vários fatores ameaçam a sobrevivência dos corais, como aquecimento global, acidificação dos oceanos, poluição e pesca excessiva. Estudos recentes exploram inovações tecnológicas, como a impressão 3D, para a criação de recifes artificiais e na reabilitação destes. O objetivo geral deste estudo é analisar como a tecnologia pode contribuir para a sustentabilidade dos oceanos. Com uma abordagem exploratória, de natureza qualitativa, realizou-se uma revisão sistemática para reunir os estudos relevantes e alinhados com o objetivo desta pesquisa. Por meio da base de dados da CAPES, Scopus e Google Acadêmico, no período de março a abril de 2024. Foram selecionados 19 estudos para análise. O resultado preliminar aponta para três fatores críticos: a gravidade dos desafios enfrentados pelos recifes de coral, a necessidade de buscar soluções práticas e sustentáveis para proteger o ecossistema e a importância de abordagens multidisciplinares e inovadoras. Verificou-se que a impressão 3D tem apresentado resultados promissores na reabilitação dos corais, embora ainda não se tenha uma análise estatística dessas iniciativas ao redor do mundo.

PALAVRAS-CHAVE: Corais, Impressão 3D, mudanças climáticas.

1. INTRODUÇÃO

A perda de corais é uma preocupação séria e crescente. O estudo de Veron¹, expõe como os corais desempenham um papel vital nos ecossistemas marinhos, proporcionando uma série de benefícios tanto para os organismos que vivem neles quanto para as comunidades humanas. Eles atuam como habitats, oferecendo abrigo, alimento e locais de reprodução para uma grande variedade de espécies marinhas, incluindo peixes, tartarugas e muitos outros. Além disso, os recifes de coral protegem as zonas costeiras contra a erosão causada pelas ondas e tempestades, servindo como barreiras naturais que ajudam a reduzir o impacto das forças oceânicas nas regiões litorâneas.

Ecologicamente, os recifes de coral são essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas marinhos, fornecendo suporte biológico para uma ampla gama de vida marinha e contribuindo para processos ecológicos importantes. Os corais possuem algas simbióticas, que vivem em seus tecidos e realizam a fotossíntese, convertendo dióxido de carbono em oxigênio, durante o processo, a perda ou redução delas influencia na dinâmica do meio ambiente².

Os corais estão enfrentando uma série de ameaças, a exemplo do aquecimento global que leva ao seu branqueamento, isso ocorre quando “a tolerância térmica dos corais e dos seus simbiontes fotossintéticos (zooxantelas) é excedida”³. Outro problema é a acidificação dos oceanos que também representa uma ameaça aos recifes de coral, pois reduz a taxa de calcificação dos construtores das estruturas⁴.

Outra ameaça é a poluição, onde os agentes encontrados nos esgotos, a exemplo de sedimentos e metais pesados, podem prejudicar gravemente o crescimento e/ou reprodução dos corais⁵. Além disso a pesca excessiva ou sobrepesca “é considerada uma das três ameaças mais significativas aos ecossistemas dos recifes de coral”, que causa importantes efeitos diretos e indiretos na estrutura da comunidade de peixes e de outros organismos, podendo reduzir a diversidade de espécies e levar à extinção local não só de espécies-alvo, mas também de outras espécies⁶.

Estudo desenvolvido aponta que a “complexidade e diversidade morfológica são características chave do projeto para a formação de recifes artificiais que podem sustentar comunidades marinhas”⁷. E chama a atenção que a impressão 3D (3DP) tornou-se um método de fabricação único no campo e apresenta uma abordagem para a cerâmica 3DP onde investigam novas morfologias para formar habitats marinhos usando manufatura aditiva (AM) com materiais ecológicos. Diante deste contexto o presente estudo busca responder a seguinte questão: como a tecnologia pode ajudar na biodiversidade marinha e na revitalização dos corais?

O objetivo geral deste estudo é analisar como a tecnologia pode contribuir para a sustentabilidade dos oceanos. E como objetivos específicos será necessário: (a) analisar os impactos ambientais causados pelo homem no ecossistema marinho; (b) analisar a importância dos corais para a sustentabilidade dos oceanos; (c) identificar estratégias de gestão sustentável dos recifes de coral (d) identificar os materiais já usados em impressão 3D de corais.

Este trabalho está organizado em cinco seções: além desta Introdução, a seção 2 apresenta a fundamentação teórica, a seção 3 descreve a metodologia utilizada, a seção 4 apresenta e discute os resultados observados e, finalmente, na seção 5 são realizadas as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os recifes de coral são ecossistemas marinhos vitais que oferecem inúmeros benefícios tanto para a biodiversidade aquática quanto para as comunidades humanas. Conforme o estudo de Hatzilios, os corais servem como habitats essenciais, fornecendo abrigo, alimento e locais de reprodução para uma diversidade de espécies marinhas. Segundo Veron, os corais são cruciais para a manutenção da biodiversidade oceânica e para a proteção das comunidades costeiras contra a erosão, uma vez que os recifes atuam como barreiras naturais que amortecem o impacto das forças oceânicas.^{8 1}

No entanto, a existência desses ecossistemas está sob ameaça devido a uma série de fatores ambientais adversos. Segundo Hughes⁹, o aquecimento global é uma das principais causas do branqueamento dos corais, fenômeno que compromete a sobrevivência desses organismos. O estudo de Riser² destaca a significativa contribuição dos corais para a produção líquida de oxigênio nos oceanos subtropicais.

O estudo de Poloczanska¹⁰ enfatiza como as alterações globais nos padrões climáticos afetam a vida marinha em escala global, alterando ciclos biológicos e deslocando espécies. Adicionalmente, Janice Lough¹¹ destaca que a poluição por sedimentos e metais pesados são também significativas ameaças aos recifes. Já os estudos de Doney¹² e Feely¹³ discutem ainda como a acidificação dos oceanos, impulsionada pelo aumento das emissões de CO₂, está causando grande impacto nos ecossistemas marinhos. Além disso pode-se dizer que a pesca excessiva é algo que também afeta diretamente a estrutura comunitária dos organismos marinhos, reduzindo a diversidade e potencialmente levando à extinção local de espécies dependentes dos recifes.

Halpern¹⁴ e Lotze¹⁵, apresentam em seus estudos o impacto humano nos ecossistemas marinhos, destacando áreas de alta pressão humana e a necessidade urgente de implementar estratégias de conservação marinha para mitigar esses efeitos negativos. Diante desses desafios, surgem inovações como a proposta por Coninck¹⁶ e Vizek¹⁷, que explora o uso da impressão 3D para criar corais artificiais. Esta tecnologia emergente apresenta uma nova fronteira para a reabilitação e restauração dos recifes. Segundo Berman⁷, essa visão é ampliada ao destacar a importância da diversidade morfológica que pode ser alcançada com a impressão 3D, criando habitats marinhos que podem imitar as complexas estruturas naturais dos recifes.

Kawecki¹⁸ diz em seu estudo como diferentes materiais, como concreto, cerâmica ou plástico, podem ser utilizados na impressão 3D para criar estruturas de coral artificial que não apenas ajudam a recuperar recifes danificados mas também promovem uma maior biodiversidade marinha através da replicação de habitats naturais.

Essas inovações representam uma luz de esperança para a conservação dos recifes de coral, indicando que a tecnologia de impressão 3D pode ser uma ferramenta valiosa na luta para preservar e restaurar o ecossistema.

3. METODOLOGIA

O presente estudo usou uma abordagem exploratória, de natureza qualitativa, para ter-se mais familiaridade sobre o tema. Realizou-se uma revisão sistemática para reunir os estudos relevantes e alinhados com o objetivo desta pesquisa. Por meio da base de

dados da CAPES, Scopus e Google Acadêmico, no período de março a abril de 2024, usou-se dois critérios de inclusão: estudos que abordassem recifes de coral ou coral artificial ou impressão de coral e ecossistema marítimo e o segundo critério foi estudos com revisão por pares.

Foram identificados 30 estudos pela similaridade da análise do título para com objeto desta pesquisa, e destes, 19 estudos foram lidos e analisados na íntegra, onde gerou-se uma planilha em Excel para organização dos dados coletados, a exemplo do título, ano, autor, análise e foco do estudo, conforme evidenciado na tabela 1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos 19 estudos nos revela informações cruciais sobre os recifes de corais: os riscos, os desafios e possíveis soluções para a conservação. Destes, quatro estudos^{7,16,17,18} abordam o tema Tecnologia/Sustentabilidade - 3D, publicado recentemente de 2020 a 2023. Três estudos abordam a problemática da acidificação dos oceanos^{12,13,4}. Três estudos abordam sobre aquecimento global e mudanças climáticas^{15,8,3}, três estudos abordam o impacto humano sobre o ecossistema^{5,6,14} dois estudos abordam sobre tecnologia e sustentabilidade^{19,8}, um fala sobre a sustentabilidade de corais¹¹, dois estudos falam sobre a importância dos corais no mundo^{2,1} e um estudo aborda sobre a degradação e recuperação dos corais¹⁵.

É importante chamar atenção para o fato de que a degradação marinha não é recente, há aproximadamente três décadas, em 1995, estudo publicado trazia alerta do impacto da ação do homem sobre o ecossistema dos recifes de coral, o autor destaca a sobrepesca, como “uma das três ameaças mais significativas aos ecossistemas dos recifes de coral”⁶ alertando que o aumento da população gerou exigências sobre os recifes como fonte de alimento, que causa efeitos nocivos reduzindo a diversidade marinha e em alguns casos levando à extinção de certas espécies.

A sustentabilidade e preservação dos oceanos apresenta desafios e oportunidades, como mostra o estudo de Hatzilios⁸, os autores chamam atenção pela necessidade de se ter uma gestão sustentável dos recifes de coral, aproveitando os recursos biológicos e minerais, mas com preservação, com equilíbrio, sob pena de termos perdas irreversíveis.

As mudanças climáticas, que trazem transformações significativas na temperatura e clima, são em geral causadas pela ação do homem. A emissão de gases liberados na atmosfera retém o calor do sol, levando ao “efeito estufa”, e o resultado que estamos vendo é o aquecimento global. O estudo de Hoegh³, discute algumas consequências das mudanças climáticas e alerta sobre o branqueamento dos corais. Já o estudo de Poloczanska¹⁰, analisa os organismos marinhos com relação às mudanças climáticas em oceanos. Em 2017, o estudo de Hughes⁹, fala do branqueamento em massa dos corais e a relação com o aquecimento global. No entanto os estudos de Lough¹¹ falam sobre como as mudanças climáticas impactam no crescimento de corais, demonstrando como a tecnologia 3D, pode mitigar a degradação dos oceanos.

O fenômeno do branqueamento de corais pode ser visto em diversas partes do planeta e de diferentes intensidades, em função das mudanças climáticas. A sustentabilidade dos oceanos já é preocupação da humanidade, pesquisas aplicadas tem sido desenvolvidas na esperança que se possa usar tecnologias em prol da manutenção e reabilitação dos corais, a exemplo do estudo desenvolvido em 2023, onde apresenta-se um método de impressão 3D para a criação de recifes artificiais⁷, ou ainda o uso da

impressão 3D na reabilitação de recifes de corais¹⁶, ou ainda, os estudos¹⁷ que buscam identificar como melhorar o estabelecimento larval de corais em superfícies impressas em 3D. Alguns resultados já se mostram promissores, no entanto, vê-se que há necessidade urgente, da aplicação desta tecnologia e de outras que possam colaborar para a ampliação e manutenção desses habitats. E em contrapartida há de se esperar que os países reduzam a emissão de gases causadores do efeito estufa.

A utilização de estruturas artificiais de coral para promover a biodiversidade marinha surge como uma resposta criativa aos desafios enfrentados pelos ecossistemas coralíneos. Kawecki¹⁸ oferece uma análise abrangente dessa abordagem inovadora, destacando seu potencial para aumentar a diversidade e a resiliência dos habitats marinhos. Essas estruturas artificiais não apenas compensam as perdas de recifes naturais, mas também oferecem novas oportunidades para a colonização de espécies marinhas. Além disso, estudos como o de Reguero¹⁹ ressaltam a importância de integrar abordagens de engenharia com a conservação dos recifes de coral, demonstrando como os próprios corais podem ser aproveitados como uma forma eficaz de proteção costeira contra eventos extremos. Essas iniciativas representam não apenas estratégias de adaptação, mas também um compromisso com a sustentabilidade e a preservação dos ecossistemas marinhos em face de mudanças globais, como a crescente acidificação dos oceanos.

A acidificação dos oceanos, resultante do aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, é um desafio crescente para a vida marinha. Estudos como os de Doney¹², Feely¹³ e Anthony⁴ destacam as consequências desse fenômeno, alertando para os impactos negativos sobre os corais e ecossistemas marinhos em geral.

Os efeitos negativos da pesca não são limitados apenas as populações dos peixes-alvo, mas também nos organismos não-alvos e nos processos ecológicos essenciais para a saúde dos recifes de coral, como a predação e o equilíbrio trófico. Os estudos de Lotze¹⁵ e Roberts⁶ exemplificam como essas ações humanas afetam o ecossistema marítimo. Além disso, Halpern¹⁴ em seu estudo mapeou as ações humanas globais nos oceanos. A preservação dos corais é essencial não apenas para a biodiversidade marinha, mas também para a saúde e equilíbrio dos ecossistemas oceânicos como um todo.

Em impressão 3D de corais, uma variedade de materiais pode ser usada. Alguns dos mais comuns incluem PLA(ácido polilático), ABS(acrilonitrila butadieno estireno) e PETG(tereftalato de polietileno glicol) . O PLA é biodegradável, mas não é resistente à água salgada. O ABS é durável, porém não biodegradável. O PETG combina durabilidade com biodegradabilidade e é resistente à água. Resinas de poliuretano também são utilizadas para simular textura e flexibilidade. Além disso, materiais compostos podem ser empregados para maior realismo. A escolha do material depende das necessidades do projeto, como resistência, durabilidade e estética.¹⁸

Tabela 1

ID	Título do Artigo	Ano	Autor	Análise	Foco
1	Corals of the World	2000	Veron, J.E.N.	Apresenta informações sobre os corais do mundo.	Corais do mundo
2	Net production of oxygen in the subtropical ocean	2008	Riser, Stephen C.; Johnson, Kenneth S.	Analisa a produção líquida de oxigênio no oceano subtropical.	produção de oxigênio
3	Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs	1999	Hoegh-Guldberg, Ove	Discute as consequências das mudanças climáticas e do branqueamento de corais para o futuro dos recifes de coral.	mudanças climáticas
4	Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders	2008	Anthony, Kenneth RN et al.	Destaca como a acidificação dos oceanos causa branqueamento e perda de produtividade nos recifes de coral.	acidificação dos oceanos
5	Sewage pollution: mitigation is key for coral reef stewardship	2015	Wear, Stephanie L.; Thurber, Rebecca Vega	Aborda a poluição por esgoto e a importância da mitigação	Poluição por esgoto
6	Effects of fishing on the ecosystem structure of coral reefs	1995	Roberts, Callum M.	Estuda os efeitos da pesca na estrutura do ecossistema dos recifes de coral.	Impactos Humano - pesca
7	Design and application of a novel 3D printing method for bio-inspired artificial reefs	2023	Berman, Ofer et al.	Apresenta um método de impressão 3D para a criação de recifes artificiais bioinspirados.	Tecnologia / Sustentabilidade - 3D
8	Coral Reefs: Challenges and Opportunities for Sustainable Management	1998	Hatzios, Mareia Eleni et al.	Apresenta desafios e oportunidades para a gestão sustentável dos recifes de coral.	Tecnologia / Sustentabilidade
9	Global warming and recurrent mass bleaching of corals	2017	Hughes, Terry P. et al.	Aborda o aquecimento global e o branqueamento em massa dos corais.	Aquecimento global
10	Responses of marine organisms to climate change across oceans	2016	Poloczanska, Elvira S. et al.	Analisa as respostas de organismos marinhos às mudanças climáticas em oceanos.	Mudanças climáticas
11	Perspectives on massive coral growth rates in a changing ocean	2014	Lough, Janice M.; Cantin, Neal E.	Apresenta perspectivas sobre as taxas de crescimento de corais em um oceano em mudança.	Sustentabilidade dos corais
12	The consequences of human-driven ocean acidification for marine life	2009	Doney, Scott	Discute os impactos da acidificação dos oceanos na vida marinha.	acidificação dos oceanos
13	Ocean acidification: the other CO2 problem	2009	Feely, Richard A. et al.	Aborda a acidificação dos oceanos como um problema decorrente do aumento das emissões de CO2.	acidificação dos oceanos
14	A global map of human impact on marine ecosystems	2008	Halpern, Benjamin S. et al.	Apresenta um mapa global do impacto humano nos ecossistemas marinhos.	Impactos Humano
15	Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas	2006	Lotze, Heike K. et al.	Discute a depleção, degradação e potencial de recuperação de estuários e mares costeiros.	Degradação e recuperação dos corais
16	3D Printing Corals: A New Era of Reef Rehabilitation	2023	Coninck, Alexis	Explora o uso da impressão 3D na reabilitação de recifes de coral.	Tecnologia / Sustentabilidade - 3D
17	Enhancing coral larval settlement on 3D printed bio-inspired surfaces	2021	Vizel, Alona	Descreve como melhorar o estabelecimento larval de corais em superfícies bioinspiradas impressas em 3D.	Tecnologia / Sustentabilidade - 3D
18	Artificial coral structures for enhancing marine biodiversity: A review	2020	Kawecki, Robert	Revisa estruturas de corais artificiais para melhorar a biodiversidade marinha.	Tecnologia / Sustentabilidade - 3D
19	Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada	2018	Reguero, Borja G. et al.	Apresenta um novo enfoque metodológico e estudo de caso de engenharia para a proteção costeira com recifes de coral.	Tecnologia / Sustentabilidade

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conservação dos recifes de coral, representa uma ameaça significativa à vida marinha e terrestre, dada a importância dos corais na produção de oxigênio e na sustentação de cadeias alimentares complexas.

As ações humanas desempenham um papel central na destruição dos corais, o aumento da poluição por exemplo é algo gerado por essas ações, resultando em consequências devastadoras como a acidificação dos oceanos e o aquecimento global.

No entanto, iniciativas tecnológicas estão sendo estudadas e empregadas, como a impressão 3D, para criar recifes artificiais e reabilitar os danificados. Essa abordagem inovadora visa aprimorar as condições de vida e promover o desenvolvimento dos ecossistemas, oferecendo uma nova esperança para a recuperação dos recifes de coral.

É crucial reconhecer a importância de buscar soluções práticas, sustentáveis e tecnológicas para proteger os recifes de coral e todo o ecossistema marítimo. vê-se que as soluções multidisciplinares e inovadoras já existentes, e identificadas neste estudo, parecem ser o começo do enfrentamento dos desafios voltados à conservação dos recifes de coral.

6. REFERÊNCIAS

- ¹ VERON, J.E.N. Corals of the World. Volumes 1-3. Townsville, Australia: Australian Institute of Marine Science, 2000.
- ² RISER, Stephen C.; JOHNSON, Kenneth S. Net production of oxygen in the subtropical ocean. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 323-325, 2008.
- ³ HOEGH-GULDBERG, Ove. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research*, v. 50, n. 8, p. 839-866, 1999.
- ⁴ ANTHONY, Kenneth RN et al. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 105, n. 45, p. 17442-17446, 2008.
- ⁵ WEAR, Stephanie L.; THURBER, Rebecca Vega. Sewage pollution: mitigation is key for coral reef stewardship. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v.1355,n.1,p.15-30,2015.
- ⁶ ROBERTS, Callum M. Effects of fishing on the ecosystem structure of coral reefs. *Conservation biology*, v. 9, n. 5, p. 988-995, 1995.
- ⁷ BERMAN, Ofer et al. Design and application of a novel 3D printing method for bio-inspired artificial reefs. **Ecological Engineering**, v. 188, p. 106892, 2023.
- ⁸ HATZIOLOS, Marea Eleni et al. (Ed.). Coral Reefs: Challenges and Opportunities for Sustainable Management: Proceedings of an Associated Event of the Fifth Annual World Bank Conference on Environmentally and Socially Sustainable Development. 1998
- ⁹ HUGHES, Terry P. et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. **Nature**, v. 543, n. 7645, p. 373-377, 2017.

- ¹⁰. POLOCZANSKA, Elvira S. et al. Responses of marine organisms to climate change across oceans. **Frontiers in Marine Science**, v. 3, p. 180581, 2016.
- ¹¹ LOUGH, Janice M.; CANTIN, Neal E. Perspectives on massive coral growth rates in a changing ocean. **The Biological Bulletin**, v. 226, n. 3, p. 187-202, 2014.
- ¹² DONEY, Scott. The consequences of human-driven ocean acidification for marine life. **F1000 biology reports**, v. 1, 2009.
- ¹³ FEELY, Richard A. et al. Ocean acidification: the other CO₂ problem. **Annual review marine science**, v. 1, p. 169-192, 2009.
- ¹⁴ HALPERN, Benjamin S. et al. A global map of human impact on marine ecosystems. **science**, v. 319, n. 5865, p. 948-952, 2008.
- ¹⁵ LOTZE, Heike K. et al. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. **Science**, v. 312, n. 5781, p. 1806-1809, 2006.
- ¹⁶ CONINCK, Alexis. 3D Printing Corals: A New Era of Reef Rehabilitation. New York: Ocean Press, 2023.
- ¹⁷ VIZEL, Alona. "Enhancing coral larval settlement on 3D printed bio-inspired surfaces." *Marine Biology*, vol. 168, no. 4, p. 68, 2021.
- ¹⁸. KAWECKI Robert. "Artificial coral structures for enhancing marine biodiversity: A review." *Marine Ecology Progress Series*, vol. 635, p. 129-142, 2020.
- ¹⁹ REGUERO, Borja G. et al. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of environmental management*, v. 210, p. 146-161, 2018.