

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

Impressão 3D de um Coral Artificial: O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Gabriel António Oliveira Monteiro

ORIENTAÇÃO

Professora Doutora Bárbara Rangel
Mestre João Teixeira



MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutor Jorge Lino Alves

PROFESSOR CATEDRÁTICO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutora Bárbara Rangel Carvalho

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutora Cláudia Alquezar Facca

PROFESSORA TITULAR DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA (BRASIL)

16

04 NOVEMBRO 2024

MESTRE Gabriel António Oliveira Monteiro
MDIP/168

RESUMO

A energia eólica *offshore* encontra-se, à data de hoje, em crescimento exponencial, fruto das suas inúmeras vantagens competitivas em relação ao consumo de energia através de combustíveis fósseis. Segundo o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), no final do ano de 2023 encontravam-se em operação mais de 13000 aerogeradores *offshore*, contando com mais de 60 GW de capacidade instalada, esperando-se um crescimento ainda mais significativo nas próximas décadas. Existem, em contrapartida, questões associadas ao desenvolvimento deste mercado de energia. A implementação dos parques eólicos acarreta consigo consequências ambientais, provocando perdas de *habitat*, deslocações migratórias fruto de perturbações sonoras e espaciais, e efeitos indiretos nos ecossistemas marinhos.

O objetivo principal desta investigação centra-se em explorar um coral artificial como agente mitigador dos impactos associados à implementação de parques eólicos flutuantes. Para isso, iniciaram-se estudos de desenvolvimento de material para a impressão 3D por via de extrusão. Testaram-se 17 amostras diferentes através de testes de extrusão manual, e apenas 6 amostras foram validadas para a extrusão na impressora *Wasp 40100*. Os estudos preliminares revelaram indicativos de qualidade numa argamassa à base de concha de mexilhão, cimento e metacaulino, validando a inserção de agregados naturais na mistura. Por fim, foi efetuado um estudo experimental do protótipo em água salgada durante 8 dias, não se tendo observado alterações estruturais e texturais na superfície da argamassa, indicativos positivos que validam a execução de testes mais longos e complexos no futuro.

Os resultados previamente apresentados deram o mote ao desenvolvimento de um coral artificial a partir de métodos de manufatura aditiva, oferecendo uma solução no combate aos impactos associados à implementação de aerogeradores *offshore* flutuantes. O trabalho sugere o acoplamento da estrutura de coral à plataforma flutuante através de rede de pesca, constituindo um método inovador na interação entre estruturas tão dispares.

Palavras-chave: *Design*, Impressão 3D, Plataforma *Offshore*, Coral Artificial.

ABSTRACT

Offshore wind energy is growing exponentially today, thanks to its many competitive advantages over fossil fuel energy consumption. According to the National Renewable Energy Laboratory (NREL), more than 13,000 offshore wind turbines were in operation at the end of 2023, with more than 60 GW of installed capacity, and even more significant growth is expected in the coming decades. There are, however, issues associated with the development of this energy market. The implementation of wind farms has environmental consequences, causing habitat loss, migratory displacements due to noise and spatial disturbances, and indirect effects on marine ecosystems.

The main goal of this research is to explore artificial coral as a mitigating agent for the impacts associated with the implementation of floating wind farms. To this end, studies began into the material development for 3D printing by extrusion. 17 different samples were tested through manual extrusion tests, and only 6 samples were validated for extrusion on the Wasp 40100 printer. Preliminary studies showed indications of quality in a mortar based on mussel shell, cement and metakaolin, validating the inclusion of natural aggregates in the mix. Finally, an experimental study of the prototype was carried out in salt water for 8 days, and no structural or textural changes were observed on the surface of the mortar, positive indications that validate the execution of longer and more complex tests future work.

The results previously presented set the tone for the development of an artificial coral using additive manufacturing methods, offering a solution to combat the impacts associated with the implementation of floating offshore wind turbines. The work suggests coupling the coral structure to the floating platform using a fishing net, constituting an innovative method of interaction between such disparate structures.

Keywords: Design; 3d printing; Offshore Foundation; Artificial Reef.

AGRADECIMENTOS

O simbolismo deste documento vai muito além do trabalho que eu depusitei no desenvolver deste projeto. Simboliza ele todas as dificuldades acadêmicas ultrapassadas, as constantes mudanças de direção, as indecisões e decisões que diretamente mudaram o destino do meu percurso. Mas simboliza também a minha coragem e determinação que me levaram a abraçar duas áreas que me são hoje extremamente queridas, a engenharia e o design.

À minha família, em especial à minha mãe e à Renata, por serem a minha inspiração pessoal e profissional. Pelos conselhos e confiança que me transmitem, e pelo amor que depositam naquilo que faço.

À Daniela. Por acreditares em mim quando eu mesmo não o faço. Por acreditares sempre no meu potencial, e por nunca desistires dos meus sonhos. Fi-lo por mim, mas fi-lo muito por ti também.

Um especial obrigado ao meu grande amigo Matos, sem ti o meu percurso teria sido muito menos rico. Guardarei para sempre todas as nossas memórias, que com orgulho digo terem mudado a pessoa que sou hoje.

Um percurso árduo e desafiante, repleto de emoções e aprendizagens. Orgulhoso do caminho que percorri, e do quanto lutei para o concluir.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento temático	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE	4
2. Estado da Arte	4
2.1 Estudo Bibliográfico.....	4
2.2 Energia Eólica	8
2.2.1 Energia <i>offshore</i>	9
2.2.2 Tecnologia Flutuante	10
2.3 Recifes de Coral	13
2.3.1 Recifes Artificiais	14
2.3.2 Recifes Artificiais Flutuantes	16
2.3.3 Relações Tróficas com Biodiversidade.....	17
2.4 Materiais de construção para CA	20
2.5 Fabricação Aditiva	25
2.6 Estudo de Mercado	29
2.7 Materiais utilizados em Recifes Artificiais	43
2.8 Análise/Reflexão.....	44
CAPÍTULO 3. CASO ESTUDO.....	46
3.1 Contexto	46
3.2 Estudo de caso: Projeto WindFloat	47
3.2.1 Zona de Implementação.....	48
3.2.2 Dimensionamento.....	49
3.2.3 Síntese conclusiva	50
3.3 <i>Design</i> como ferramenta para a preservação da biodiversidade	51
3.4 Metodologia Experimental.....	53
3.5 Inspirações Conceituais.....	54
3.6 Desenvolvimento do conceito.....	56
3.7 Criação do modelo tridimensional	62
3.7.1 <i>Design</i> para impressão 3D.....	62
3.7.2 Processo construtivo	63

3.7.3	Sistema de fixação do coral	64
3.8	Plano experimental	66
3.8.1	Caraterização do material	66
3.8.1	Impressão 3D.....	71
3.8.2	Desenvolvimento do material	72
3.8.3	Conclusões	79
3.9	Protótipo.....	82
3.9.1	Limitações detetadas	87
3.9.2	Teste Experimental	89
CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES.....		93
4.1	Conclusão	94
4.2	Trabalhos futuros	95
Referências Bibliográficas.....		96
Anexos		104
Anexo A – Desenhos Técnicos.....		104

Índice de Figuras

Figura 1. Análise de coocorrência de palavras-chave em artigos de investigação indexados de 1990 a 2024.	5
Figura 2. Análise posterior de coocorrência de palavras-chave de fontes de dados e ferramentas para análise de recifes artificiais em plataformas de geração de energia eólica (1962-2024).	6
Figura 3. Rede de cooperação de autores distintos.	7
Figura 4. Consequências ambientais da última década (WMO, 2023). a) Recorde de temperaturas médias globais à superfície em 2023; b) Recorde de concentrações de GEE na atmosfera em 2022.	8
Figura 5. Projetos anunciados e operacionais do mercado de energia offshore (Musial et al., 2022).	9
Figura 6. Tecnologia offshore. a) Capacidade operacional global dos diferentes tipos de fundações (WindEurope, 2022); b) Tipos de fundações offshore (Bentley Expert, 2022).	9
Figura 7. Exemplos de conceitos da tecnologia flutuante offshore em aplicação. a) Hywind; b) WindFloat; c) FLOATGEN.	10
Figura 8. Tipos de plataformas offshore flutuantes, com base no mecanismo de estabilidade estática (Kreider et al., 2021).	11
Figura 9. Estabilidade de plataformas flutuantes a) Definição das estruturas flutuantes de acordo com o triângulo de estabilidade estática (Leimeister et al., 2018); b) Enquadramento das FOWT no triângulo de estabilidade (Chitteth Ramachandran et al., 2022).	11
Figura 10. Representação da diminuição estrutural dos corais, resultado do coral bleaching (I. Matus, 2020).	13
Figura 11. Distribuição global da investigação sobre recifes artificiais e desenvolvimento do período de estudo: curta duração (<2 anos) e longa duração (>2 anos) (Silva Lima et al., 2019).	14
Figura 12. Compilação das principais geometrias utilizadas na conceção de CA (Fabi et al., 2011).	15
Figura 13. Representação ilustrativa das relações tróficas entre corais e comunidades de plâncton e peixes, e o tipo de influência (positiva ou negativa que possuem entre si (Ladd & Shantz, 2020).	18
Figura 14. Disposição geográfica dos 23 recifes artificiais implementados ao largo da Carolina do Norte, fruto do trabalho de investigação de (Lemoine et al., 2019).	18
Figura 15. Desempenho dos quatro tipos de corais artificiais testados em termos de riqueza de biodiversidade e abundância (Lemoine et al., 2019).	19
Figura 16. Materiais amplamente utilizados na conceção de recifes artificiais (AW Ramm et al., 2021).	20
Figura 17. Materiais mais utilizados como aglutinantes em misturas de cimento (Fonseca & Matos, 2023).	24
Figura 18. Comparação da manufatura aditiva com procedimentos convencionais, em termos de complexidade de produto, precisão e custos (Godec et al., 2022).	25
Figura 19. Classificação do fabrico aditivo de acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM) (Godec et al., 2022).	26
Figura 20. Ilustração do processo de impressão 3D LDM, com impressora Wasp (3D Bonum, 2020).	27
Figura 21. Range de soluções de CA contempladas no projeto Reef Arabia (Reef Arabia, 2012).	29

Figura 22. Manifestação de resultados positivos em relação à deposição de microrganismos e atração de peixes (Cosgrove, 2016).	29
Figura 23. Projeto Mars. a) Modularidade do projeto; b) Conexão entre módulos (Reef Design Lab, 2019).	30
Figura 24. Resultados da deposição do coral no fundo oceânico, revelando bons índices de colonização de espécies (Reef Design Lab, 2019).	30
Figura 25. Propagação e restauração de corais através de estruturas biorock (Lawson Liberty, 2018).	31
Figura 26. Painéis modulares Living Seawalls. a) Morfologia do painel; b) Diferentes tipologias dos painéis.....	32
Figura 27. Resultados demonstrativos da instalação dos painéis Living Seawalls.	32
Figura 28. Painel Living Seawalls com Volvo car. a) Estrutura final fabricada em betão; b) Disposição modular dos painéis (Yalcinkaya Gunseli, 2019).	33
Figura 29. Programa de restauração da GBR, através da implantação de corais. a) Processo de implantação e Monitorização de agregados de coral; b) Sistema de fixação CoralClip.	34
Figura 30. Projeto Buoyant Ecologies Float Lab. a) Implantação da estrutura no mar; b) Conceito do projeto (Marcus Adam et al., 2019).	35
Figura 31. Fabrico e implementação do recife artificial em Poole Bay, costa sul de Inglaterra (Bournemouth University, 2019).	36
Figura 32. Resultados do projeto, após dois anos da implementação (Bournemouth University, 2019). a) Deposição variada de espécies na estrutura ao fim de dois anos; b) Deposição de espécies de caranguejos nos buracos da estrutura.....	37
Figura 33. Processo construtivo da estrutura (Eduardo Souza, 2020).	38
Figura 34. Recife artificial em argila. a) Método de disposição modular das estruturas; b) Implantação de fragmentos de coral na estrutura como objeto de monitorização.	38
Figura 35. Fases concetuais do projeto Floating Reef (Pure Ocean, 2022). a) Primeiro modelo; b) Segundo modelo; c) Terceiro modelo.	39
Figura 36. Proposta concetual da fase 3 do projeto (Pure Ocean, 2022). a) Simulação de teste de monitorização das estruturas; b) Protótipo da estrutura.....	40
Figura 37. Processo de instalação dos recifes artificiais no Grande Mar do Norte.	41
Figura 38. Colonização de espécies na estrutura, maioritariamente micro-organismos.	41
Figura 39. Concetualização do projeto EMU (Reef Design Lab, 2023). a) Demonstração da possibilidade de disposição das estruturas; b) Protótipos prontos para deposição.	42
Figura 40. Monitorização das estruturas EMU (Goad Alex, 2023).	42
Figura 41. Projeto WindFloat em Viana do castelo, Portugal (WindFloat®, 2024).	47
Figura 42. Linha temporal do projeto WindFloat (WindFloat®, 2024).	48
Figura 43. Localização geográfica do projeto dentro da ZEE portuguesa.....	48
Figura 44. Estrutura WindFloat. a) Dimensionamento principal da estrutura; b) Estrutura triangular semi-submersível (Y. Jiang et al., 2020; WindFloat®, 2024).	49
Figura 45. Contraste entre o design técnico convencional e o design apoiado por premissas ecológicas e sustentáveis (Mang & Reed, 2012).	51
Figura 46. Organograma das etapas experimentais do caso de estudo.....	53
Figura 47. Projetos de design emergentes na recriação de sistemas vivos sustentáveis.	54
Figura 48. Principais caraterísticas observadas do comportamento dos corais como fonte de inspiração.	55
Figura 49. Parâmetros identificados na concha como inspiração para o processo criativo.....	56
Figura 50. Exemplo de um Brain Coral, como fonte de inspiração imersiva na elaboração de caminhos labirínticos.....	57

Figura 51. Influência do desperdício de plástico derivado de rede nos oceanos como inspiração para o método construtivo do coral.....	58
Figura 52. Fase um, dois e três do processo criativo.....	60
Figura 53. Fase quatro do processo criativo.....	61
Figura 54. Processo construtivo para a criação do protótipo de CA utilizando o software Solidworks. a) Criação de labirinto em sketch utilizando o comando Spline; b) Projeção vertical do sketch utilizando o comando Surface-Extrude; c) Utilização do comando Surface-Trim para oferecer a topologia desejada à parte superior; d) Vista frontal da utilização do comando Surface-Trim que corta as superfícies através de uma linha definida; e) Modelo para impressão 3D; f) Aplicação do comando Thicken de modo a oferecer espessura às superfícies criadas anteriormente; g) Aplicação do mesmo comando Surface-Trim à parte inferior; h) Modelo para impressão 3D; i) Aplicação do comando Thicken de modo a oferecer espessura às superfícies criadas.	63
Figura 55. Sugestão da utilização do adesivo para betão Sikadur®-32+.	64
Figura 56. Sistema de fixação do coral, nomeadamente entre as duas partes existentes.....	64
Figura 57. Vista explodida do sistema coral-rede. Sistema de fixação coral-rede.	65
Figura 58. Render da vista explodida do sistema coral-rede.....	65
Figura 59. Divisão do plano experimental em quatro fases: Preparação do material; estudo do material; calibração; impressão.	66
Figura 60. Materiais utilizados no período experimental do estudo.	67
Figura 61. Dados estatísticos retirados de um artigo, revelando os tipos, graus e classes de cimento mais utilizados numa amostra de 157 projetos publicados na comunidade científica (Fonseca & Matos, 2023).	67
Figura 62. Granulometria padrão da concha, disponibilizada pela Finisterra.	68
Figura 63. Trituração do material concha de mexilhão. a) Introdução do material no moinho de martelos SK100; b) Absorção de poeiras resultantes da trituração; c) Granulometria irregular obtida.	69
Figura 64. Processo de peneiramento do material concha de mexilhão. a) Agitador de peneiros digital; b) Amostras com as diversas granulometrias referidas.....	69
Figura 65. Antes e após o processo de trituração do tijolo, de forma a obter o material desejado para o procedimento experimental, o pó de tijolo.	70
Figura 66. Condições experimentais. a) Impressora Delta Wasp 40100; b) Laboratório H102... ..	71
Figura 67. Divisão do estudo do material em dois momentos.....	72
Figura 68. Relação entre parâmetros que definem a qualidade da impressão, segundo (Teixeira, 2018).	73
Figura 69. Primeiro set de amostras efetuadas, inseridas em M1.M.....	74
Figura 70. Testagem da amostra M.7 na impressora 3D, segundo uma geometria aleatória. Avaliação de parâmetros como a deposição de camadas, fluidez do material, entre outros.....	75
Figura 71. Observação de resultados da amostra M.12, após alguns dias de repouso e secura.....	76
Figura 72. Impressão de amostras relativas ao segundo momento do procedimento experimental, onde se observam as características visuais das camadas referentes às amostras M.8, M.9, M.10, M.11 e M.12.	77
Figura 73. Primeiro set de amostras efetuadas, inseridas em M1.P.	78
Figura 74. Observação de porosidade após período de secura, em amostra P.4.....	78
Figura 75. Composição da amostra selecionada para a fase de prototipagem em Wasp 40100.	79
Figura 76. Processo de mistura dos materiais para a argamassa. a) Pesagem dos materiais; b) Primeiro momento do processo de mistura; c) Segundo momento do processo de mistura. ...	82

Figura 77. Processo de amassadura da argamassa.	82
Figura 78. Processo de impressão do módulo 1 do protótipo de coral. a) Deposição das primeiras camadas; b) Deposição da rede por cima da terceira camada; c) Parte superior do coral impressa.	83
Figura 79. Processo de impressão do módulo 2 do protótipo de coral.....	84
Figura 80. Pós-impressão Módulo 2.....	84
Figura 81. Pós-impressão Módulo 1.....	84
Figura 82. Escorrimento de material fruto do corte repentino do filamento para o início do filamento seguinte.	87
Figura 83. Limitação na deposição de camadas sobre a rede de pesca. a) Engate do bocal de impressão na rede, provocando deslizamento de material; b) Deposição de camada posterior à situação de engate, continuando o processo de impressão.	88
Figura 84. Teste experimental conduzido pelo autor. a) Obtenção de água salgada através do enchimento de garrações; b) Iniciação do teste experimental com a colocação do coral na piscina.....	89
Figura 85. Coral em contexto real simulado.....	90
Figura 86. Vista realista do módulo 1 do produto.....	91
Figura 87. Vista realista do módulo 2 do produto.....	92
Figura 88. Visão geral da implementação do conceito e valorização ecológica.....	93

Índice de Tabelas

Tabela 1. Caracterização dos mapas de relações efetuados no software VOSviewer.	4
Tabela 2. Os cinco principais autores na temática dos recifes artificiais e energia eólica.	6
Tabela 3. Características dos principais tipos de configuração de plataformas flutuantes.....	12
Tabela 4. Análise de risco na utilização de estruturas de coral flutuantes.....	16
Tabela 5. Avaliação do betão de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.	22
Tabela 6. Avaliação do betão ecológico de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.	22
Tabela 7. Avaliação da cerâmica de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.	23
Tabela 8. Avaliação da argila de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.	23
Tabela 9. Vantagens e desvantagens da utilização do processo LDM.	28
Tabela 10. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Reef Arabia.	29
Tabela 11. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Mars.	31
Tabela 12. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Living Seawall.	33
Tabela 13. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto GBR.....	34
Tabela 14. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto..	35
Tabela 15. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto 3DPARE.	37
Tabela 16. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto..	38
Tabela 17. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Floating Reef.....	40
Tabela 18. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Ørsted /WWF.....	41
Tabela 19. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto EMU.....	43
Tabela 20. Tabela resumo das dimensões gerais e materiais utilizados nos projetos reunidos.	43
Tabela 21. Parâmetros principais da plataforma do tipo WindFloat (Y. Jiang et al., 2020).	49
Tabela 22. Composição química da concha de mexilhão.	68
Tabela 23. Parâmetros de impressão para o fabrico da peça.....	71
Tabela 24. Definição dos constituintes das argamassas a serem estudadas.....	73
Tabela 25. Quantificação dos testes de impressão realizados, de acordo com o tipo de argamassa utilizada e momento.	74
Tabela 26. Momento M1.M. Sequência de amostras de extrusão manual da argamassa A.	74
Tabela 27. Momento M2.M. Ajuste das composições relativas à argamassa A e validação de resultados a partir da extrusão na impressora.....	76
Tabela 28. Momento M1.P. Execução das primeiras amostras utilizando o material pozolânico pó de tijolo.	77
Tabela 29. Sistema de pontuação das amostras que utilizaram metacaulino na sua composição.	81
Tabela 30. Sistema de pontuação das amostras que utilizaram pó de tijolo na sua composição.	81

Lista de Abreviaturas

3DPC – *3D Printed Cementitious Concrete*

CA – Coral Artificial

CAD – *Computer-Aided Design*

EMS – Sistemas de Materiais Extrudidos

ER – Energias Renováveis

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GBR – *Great Barrier Reef*

GW – Gigawatt

LDM – *Liquid Deposition Modeling*

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MW – Megawatt

PBS – *Power Based Systems*

PC – *Portland Cement*

RC – Recifes de Coral

TLP – *Tension Leg Platform*

WMO – *World Meteorological Organization*

WWF – *World Wide Fund for Nature*



Recife de Coral, Chris Reyem

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1. Introdução

Atualmente, o consumo de energia deriva ainda predominantemente de fontes dramaticamente nocivas ao planeta, as energias renováveis (ER) surgem como resposta gradual e potencial substituta aos combustíveis fósseis. Estatísticas apontam para um crescimento exponencial deste tipo de energia, ganhando naturalmente o seu espaço naquilo que é a progressiva transição energética da última década (Calvin et al., 2023). No entanto, associado a este rápido crescimento, nascem preocupações que necessitam ainda de ser revistas.

O tema desta dissertação focar-se-á em problemas associados à produção de energia eólica em alto mar (*offshore*). Entre elas, destaca-se o impacto na biodiversidade marinha, com repercussões potencialmente destruidoras do ecossistema. Tendo isto em conta, o desenvolvimento concetual deste projeto contará com a criação de um coral artificial, através de impressão 3D, com a potencial futura acoplação às plataformas flutuantes dos aerogeradores. É de notar que tanto o *design* como a engenharia se complementarão nas várias fases de desenvolvimento do projeto e da futura otimização do mesmo nas plataformas dos aerogeradores.

1.1 Enquadramento temático

A energia eólica *offshore* representa uma das maiores formas de energia limpa e é dos setores energéticos que notou maior crescimento nas últimas décadas, traduzindo-se em inúmeros projetos piloto por todo o planeta (Fazeres-Ferradosa et al., 2018). De acordo com a entidade *Global Wind Energy Council*, é esperado um investimento de mais de 380 GW em produção de energia eólica *offshore* durante a próxima década. Esta estatística traduz a importância de se avaliar os impactos deste tipo de captação energética e compreender a sua influência na transição para um consumo sustentável.

O estudo de Rezaei et al. avaliou os principais estudos efetuados pela comunidade científica acerca dos potenciais impactos ambientais resultantes da implementação de eólicas *offshore* nos ecossistemas marinhos (Rezaei et al., 2023). Exemplos desses impactos centram-se sobretudo em alterações sonoras, principalmente em fase de implementação de projeto e rotação de pás, a criação de substrato inorgânico nas fundações e alterações na cultura piscatória, nomeadamente na pesca de arrasto. Parte das complicações associadas reside no impacto que as estruturas têm na biodiversidade marinha na zona de implementação e pode incluir graves períodos migratórios, onde aves, peixes e mamíferos marinhos tendem a evitar a localização devido à dimensão da estrutura, ruído, extensa cabelagem associada e outras perturbações. Quando deslocados dos locais de alimentação ou de procura de alimento, os animais necessitam de mais energia para encontrar alimento noutra local, o que pode comprometer a sua sobrevivência (Kershaw Francine & Loomis Rebecca, 2021). Neste cenário, torna-se fundamental agir de forma a mitigar os problemas intrínsecos à exploração desta tecnologia nos oceanos.

Dentro desta vertente, Portugal destaca-se pela sua localização geográfica, que lhe permite ter a terceira maior Zona Económica Exclusiva da União Europeia, cerca de quinze vezes a sua área continental. Assim sendo, e tendo em conta a necessidade global de se aumentar a produção de energia verde, a instalação de parques eólicos *offshore* surge como uma solução viável para a produção sustentável de energia (Limpo, n.d.).

Embora já existam inúmeras soluções para a reestruturação e preservação ecológica dos ecossistemas, nomeadamente na construção de recifes artificiais, estas soluções abrangem naturalmente zonas costeiras e/ou zonas de baixa profundidade. Por sua vez, o surgimento da tecnologia flutuante traz um novo conjunto de desafios, sobretudo na existência de ecossistemas mais complexos (maior número de níveis tróficos) e de profundidades elevadas, dificultando o processo de aplicação e monitorização dos recifes.

Contudo, soluções como os corais artificiais (CA) tomam já forma como soluções menos vulneráveis a estes fatores antropogénicos e viáveis na complementaridade que podem ter com aerogeradores eólicos. A impressão 3D de recifes artificiais oferece alternativas de restauração e preservação da biodiversidade marinha em zonas críticas como a de implementação de geradores eólicos, oferecendo *habitat* para espécies potencialmente afetadas. A manufatura aditiva oferece a liberdade orgânica que o processo de *design* requiere em estruturas deste tipo, no que toca à complexidade estrutural, geometria, custo, entre outros.

Desta forma, a elaboração desta dissertação centrou-se num esforço em contribuir para a otimização da relação que os aerogeradores flutuantes possuem com o ecossistema rodeante, onde foi necessário decodificar uma solução inovadora no modo de implementação dos recifes artificiais. Na perspetiva do *design*, é importante compreender a relação da forma com a biocompatibilidade animal, de forma a devolver ao oceano uma estrutura orgânica com o mínimo impacto no ecossistema. Algumas questões que motivam a procura de soluções inovadoras para responder aos problemas anteriormente detetados e discutidos são agora colocadas.

Serão estas soluções suficientemente eficientes para garantir a propagação e colonização de novas comunidades de coral?

Que materiais são mais apropriados para o crescimento da espécie, menos poluentes para o meio ambiente e mais atrativos para outros organismos que convivem no mesmo ecossistema?

1.2 Objetivos

O problema anteriormente abordado foi o ponto de partida para um estudo imersivo de uma solução que colmate uma percentagem dos impactos associados à implementação da tecnologia *offshore* nos ecossistemas marinhos. A existência de lacunas tanto na oferta de mercado como em revisões de literatura científica relativamente a este tema oferece uma oportunidade única para a descoberta de soluções inovadoras neste campo de investigação. Esta tese considerou o conceito de coral artificial como uma solução viável na simbiose com as fundações flutuantes dos aerogeradores eólicos.

Com a finalidade de dar resposta à problemática principal, os objetivos desta investigação são os seguintes:

- i. **Desenvolvimento concetual:** Validar o conceito de uma simbiose entre corais artificiais e plataformas eólicas flutuantes;
- ii. **Desenvolvimento construtivo:** Estudar a aplicação de processos de manufatura aditiva (impressão 3D) na criação de estruturas como os corais artificiais;
- iii. **Estudo de Materiais Sustentáveis:** Desenvolver um material sustentável, adequados para a impressão 3D de corais artificiais que possam suportar condições marinhas adversas, promovendo a durabilidade e a integração com o ambiente natural;
- iv. **Análise:** Pesquisar e introduzir materiais e tecnologias inovadoras.

1.3 Metodologia

De forma a estruturar esta investigação, estabeleceu-se uma metodologia sistematizada que teve início numa pesquisa bibliográfica aprofundada, incluindo um estudo bibliográfico, em relação às temáticas do *design*, engenharia e biologia. A estruturação deste estudo permitirá evidenciar trabalhos de maior relevância e adequabilidade para a tese em questão. Baseando-se nesta revisão de literatura, procedeu-se à execução do caso de estudo, onde se realizaram testes experimentais na vertente do material, com o objetivo de validar a exequibilidade do projeto. Com base nos resultados obtidos, foi elaborada uma proposta concetual do produto, assim como as conclusões e recomendações futuras.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi dividida em três capítulos: os dois primeiros abordam a contextualização do problema e a revisão de literatura que sustentará o projeto – “Capítulo I - Introdução” e “Capítulo II - Revisão de Literatura” – e outro onde se aplicaram os conhecimentos adquiridos – “Capítulo III – Caso Estudo”.

A primeira subdivide-se em dois momentos distintos. Num primeiro momento, é efetuado um estudo bibliográfico com o objetivo de apresentar credibilidade e adequabilidade ao estudo da temática. Num segundo momento, é realizada uma revisão de literatura pormenorizada e aprofundada sobre a temática dos CA aplicada à mitigação de impactos ambientais.

A segunda componente de abordagem é dedicada ao desenvolvimento de produto, que engloba diferentes fases. Começa pela exploração inicial e fracionamento do problema, passando pelo processo criativo de obtenção de forma e desenvolvimento do conceito, análise de soluções construtivas e materialização de um protótipo funcional, aos testes experimentais.

A dissertação é concluída com uma discussão abrangente, onde os conhecimentos adquiridos foram consolidados, apresentando-se reflexões sobre as limitações do estudo, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos do projeto.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

2. Estado da Arte

Neste capítulo, são explorados e pesquisados os principais tópicos e conceitos, de forma a perceber como responder às necessidades do projeto (de acordo com o objetivo da investigação). Isto inclui um aprofundamento das temáticas dos mercados energéticos verdes, nomeadamente de energia eólica *offshore*, uma visão geral da temática dos recifes de coral (RC), materiais amplamente utilizados na construção de recifes artificiais e a temática da fabricação aditiva. O capítulo termina com uma secção sobre o estudo de mercado efetuado, introduzindo ilações importantes para a fase de desenvolvimento do projeto.

2.1 Estudo Bibliográfico

O estudo bibliográfico efetuado pretende tirar ilações sobre o panorama investigacional da área, recorrendo-se à base de dados Scopus®. Com este estudo, tirar-se-ão conclusões sobre a pertinência da temática e do seu enquadramento naquilo que pode ser a procura pela inovação. O estudo conta com a realização de três mapas recorrendo ao *software VOSviewer*, através dos quais se estabelecerão ilações relativas a relações de coocorrência entre palavras-chave e relações de coautoria. Este tipo de abordagem pode ser determinante no seguimento do projeto de trabalho, sendo possível identificar os autores de maior renome no campo científico da área, bem como identificar novas palavras-chave para o tema.

Para isso, e em modo de organização, caracterizou-se cada mapa efetuado no *software VOSviewer* de acordo com os principais parâmetros que o definem. Exemplos são o número de documentos analisados por mapa e o tipo de relação que se estabelece (ex: Coautoria). Esta informação encontra-se na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos mapas de relações efetuados no *software VOSviewer*.

Mapa	Relação	Nº Documentos	Limiar de ocorrência	Palavras-chave	Autores
1	Coocorrência	2663	5	1328	----
2	Coocorrência	72	5	789	----
3	Coautoria	72	1	----	232

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

O objetivo do mapa 1 é demonstrar a abrangência do tema dos recifes artificiais enquanto palavra-chave, denotando-se diversos níveis de conexão e diversas forças entre os níveis. Alguns exemplos são: *coral reef*; *fish*; *ecosystems*; *community structure*. A partir deste ponto será possível convergir a informação de modo a filtrar palavras e relações de maior importância (mapa 2).

Figura 1. Análise de coocorrência de palavras-chave em artigos de investigação indexados de 1990 a 2024.

O mapa 2 (Figura 2) conta, por sua vez, com a extração das palavras-chave “Artificial Reef AND Offshore Wind”, extraída dos títulos e resumos de 72 documentos. Manteve-se a configuração do mapa 1, estabelecendo-se um limiar do número mínimo de cinco ocorrências de uma palavra-chave. Com esta nova seleção de palavras-chave pretende-se filtrar as relações que existem em comum entre as temáticas, onde se depreende desde logo uma quantidade de relações muito menos densa. Isto indica-nos que existe uma quantidade significativamente menor de estudo científico abrangente às duas áreas de estudo e, por outro lado, as relações de maior importância para o caso de estudo em questão. Alguns exemplos são: *wind farm*; *marine environment*; *fisheries*.

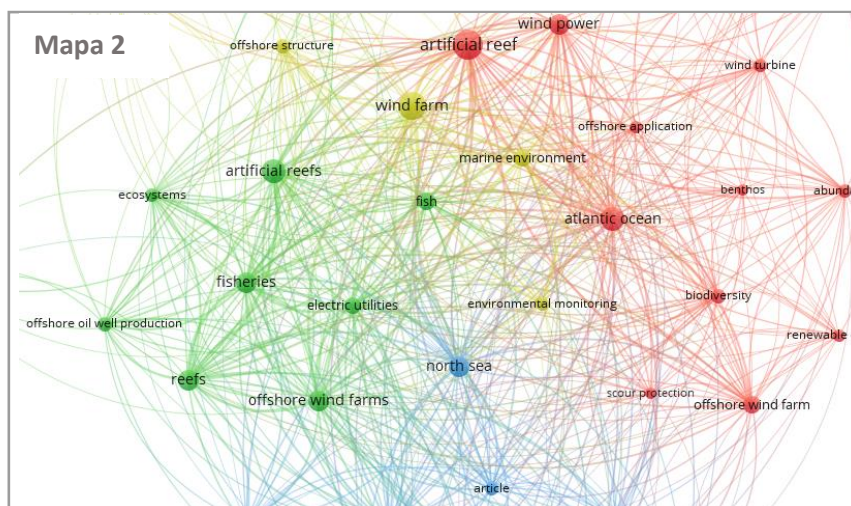


Figura 2. Análise posterior de coocorrência de palavras-chave de fontes de dados e ferramentas para análise de recifes artificiais em plataformas de geração de energia eólica (1962-2024).

O mapa 3 (Figura 3) estabelece, por outro lado, uma relação de coautoria, extraída dos títulos e resumos dos mesmos 72 documentos relativos ao mapa 2, com o objetivo de se identificar os autores com maior influência no campo investigacional. Tendo em conta o escasso número de autores identificados (232), alterou-se a configuração padrão e não se estabeleceu um número mínimo quer de documentos publicados, quer de citações. Como é possível observar no mapa, o autor com mais documentos publicados nas temáticas dos recifes artificiais e energia eólica *offshore* é o autor *Steven Degraer* com 15 documentos publicados. É também o autor mais citado, com 676 citações registadas.

Tabela 2. Os cinco principais autores na temática dos recifes artificiais e energia eólica.

Rank	Autor	País	Documentos	Citações
1	Steven Degraer	Bélgica	15	676
2	Dan Wilhelmsson	Suécia	5	300
3	Bob Rumes	Bélgica	4	310
4	Francis Kerckhof	Bélgica	4	263
5	J.T. Reubens	Bélgica	4	211

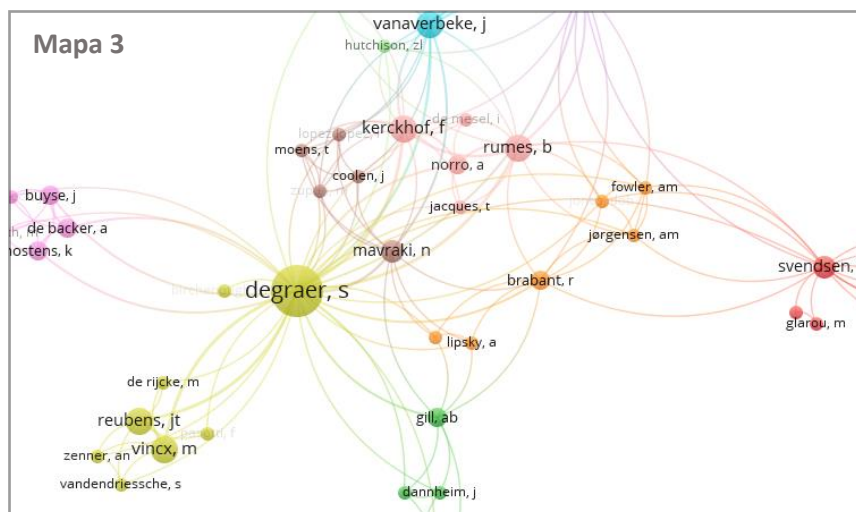


Figura 3. Rede de cooperação de autores distintos.

O panorama investigacional contemplado nos mapas elaborados no software de gestão bibliográfica *VOSviewer*, permite perceber o afunilamento que existe quando se relacionam as palavras-chave de maior importância da dissertação. Atendendo ao facto de se ter recorrido apenas a uma plataforma de base de dados (Scopus®), é importante compreender que as ilações retiradas estão restringidas à sua profundidade de informação disponível.

No entanto, atendendo à base de dados que foi utilizada, conclui-se que existe um escasso número de publicações científicas que abordem as temáticas dos recifes artificiais e da energia eólica em conjunto. Esta estatística confere uma vertente inovadora e criativa à dissertação e desenvolvimento do projeto.

2.2 Energia Eólica

As ER têm, nas últimas décadas, ganho especial relevância no panorama mundial, ganhando naturalmente o seu espaço naquilo que é a feroz transição energética da última década (Calvin et al., 2023), no que toca à abolição da energia proveniente da queima de combustíveis fósseis. Esta transição deverá ser encarada como resposta às consequências que se têm vindo sentir sobretudo a nível ambiental. Dados de 2023 da *World Meteorological Organization* (WMO) revelam recordes de temperaturas médias globais atingidas próxima da superfície de $1,45 \pm 0,12^\circ\text{C}$ superior à média de 1850-1900 (Figura 4 a)). Há também um recorde de concentrações atmosféricas dos principais GEE observados em 2022 (Figura 4 b)), o último ano para o qual existem valores globais consolidados (WMO, 2023).

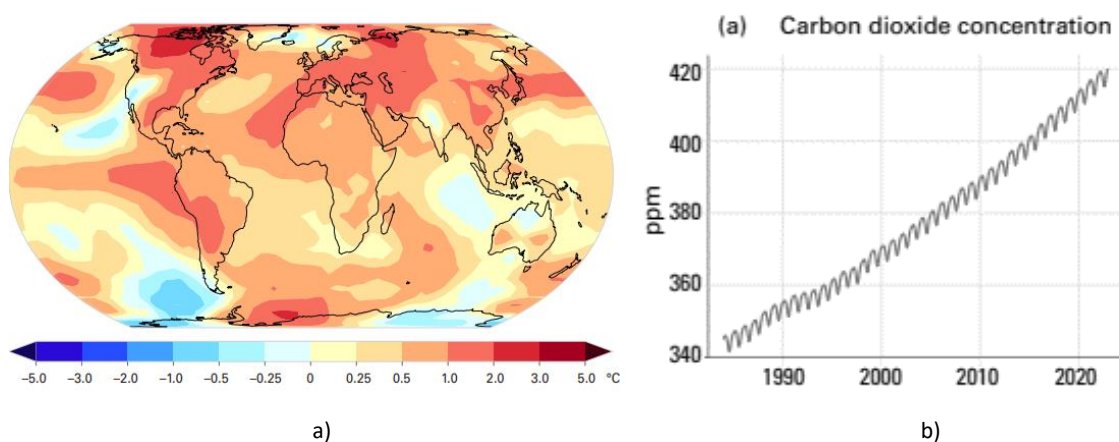


Figura 4. Consequências ambientais da última década (WMO, 2023). a) Recorde de temperaturas médias globais à superfície em 2023; b) Recorde de concentrações de GEE na atmosfera em 2022.

Tendo isto em conta, será natural olhar-se para as ER como objeto de estudo e potencial substituto dos combustíveis fósseis na geração de energia. Estima-se que o potencial das ER seja notoriamente superior à procura mundial, o que a torna economicamente competitiva em relação aos combustíveis fósseis (Calvin et al., 2023).

Um dos tipos de ER de especial interesse é o aproveitamento da energia do vento. À data de hoje, a energia eólica representa uma faixa de cerca de 16,1% do consumo energético mundial, uma fatia com bastante significado, quando existe ainda um consumo predominante de energia proveniente de combustíveis fósseis (WindEurope, 2024). Torna-se, desse modo, irrefutável pensar que a energia eólica terá um papel crucial no alcançar das metas propostas pelos governos para 2030 e 2050, numa esperança de redução drástica das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera.

A Europa continua a ser a porta da frente para a entrada deste mais recente tipo de energia, tornando-se imprescindível a introdução de maior quantidade de energia na rede, anualmente. Estudos analíticos afirmam que, para que se atinja a meta de 45% de ER até 2030, as instalações de energia eólica deverão representar uma média de 31GW de energia injetada na rede por ano (Wind Europe, 2022). Um total de 255 GW de energia eólica está neste momento instalada na Europa, sendo 88% desta capacidade (225 GW) instalada em terra (*onshore*) e 12% (30 GW) em mar (*offshore*).

O mercado *offshore* encontra-se neste momento em descolagem, enquanto o mercado *onshore* cresce de forma mais gradual, naturalmente mais condicionado por parâmetros como a localização geográfica e paisagem. O crescimento deste mercado, operacional e anunciado (Figura 5), deve-se sobretudo ao larguíssimo espaço marítimo à disposição, havendo uma maior predisposição para um desenvolvimento exponencial e escalável. A figura 5 revela os projetos anunciados para este tipo de mercado, e demonstra a potencialidade de crescimento que possui na introdução de turbinas de maiores dimensões e capacidades, naturalmente traduzindo-se em maior quantidade de energia produzida.

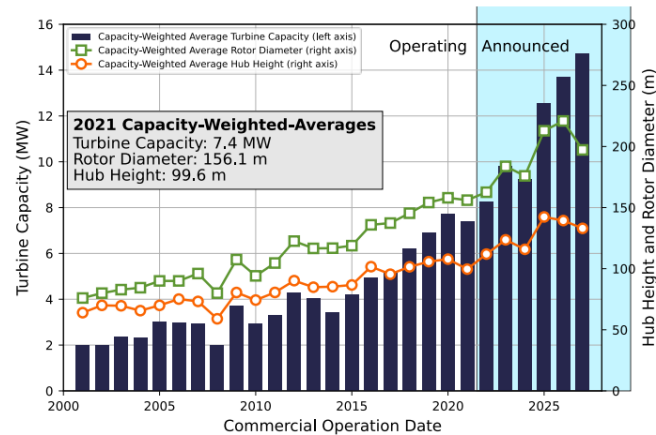
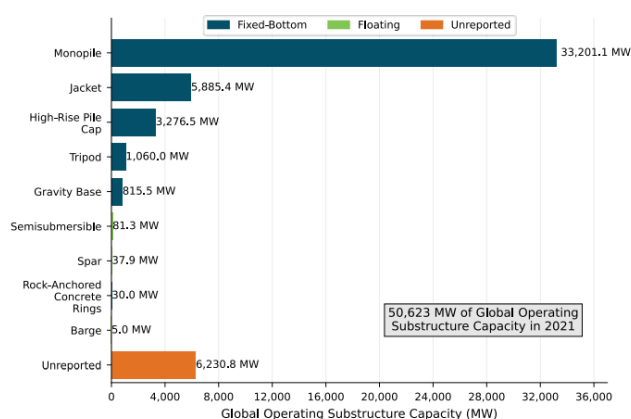


Figura 5. Projetos anunciados e operacionais do mercado de energia *offshore* (Musial et al., 2022).

2.2.1 Energia *offshore*

Em prol do potencial que possui, a tecnologia *offshore* vem-se desenvolvendo gradualmente, apresentando de forma regular novas soluções de sustentação dos aerogeradores, representando entre 16 a 34% dos custos totais de um projeto. Estas soluções dividem-se em dois grandes grupos: as fundações fixas ao fundo do oceano e as fundações flutuantes, respetivamente representadas da direita para a esquerda na figura 6 (b).



a)



b)

Figura 6. Tecnologia *offshore*. a) Capacidade operacional global dos diferentes tipos de fundações (WindEurope, 2022); b) Tipos de fundações *offshore* (Bentley Expert, 2022).

As configurações mais utilizadas até ao momento são as que se encontram fixas, representando mais de 90% dos projetos instalados (Figura 6 a)), sendo que só a fundação *Monopile* (WindEurope, 2022), representa cerca de 64,4% do mercado total de plataformas eólicas *offshore*. Apesar da grande variedade de opções é ainda colocado maior foco na elaboração de projetos com fundações fixas ao fundo do oceânico, o que representa naturalmente uma maior facilidade de implementação e de manutenção (Musial et al., 2022). Dentro desta gama, destacam-se as plataformas *monopile*, *gravity base* e *jacket*. Esta distinção de plataformas deve-se sobretudo a uma necessidade de se cobrir uma área marítima mais abrangente, tendo em conta a grande variedade morfológica do tipo de solo marinho, e da necessidade em cobrir diferentes tipos de profundidade. Neste âmbito, há uma ligação intrínseca entre o tipo de fundação utilizada com a profundidade a que se pretende instalar o aerogerador.

2.2.2 Tecnologia Flutuante

Apesar das estruturas fixas representarem uma grande parte do mercado económico das plataformas *offshore*, a disponibilidade limitada de áreas de águas rasas pouco profundas deu origem à necessidade de se instalar turbinas eólicas em locais de maior profundidade (C. Guedes. Soares, 2019), estimando-se um crescimento exponencial deste tipo de tecnologia (Musial et al., 2022). Esta pressupõe desde logo alcances superiores a 50 metros, naturalmente associadas a condições mais flexíveis de instalação, impacto visual diminuído e normas acústicas mais abrangentes. Além disto, há o acesso a recursos eólicos de maior interesse energético e económico, nomeadamente em ventos com fluxos mais uniformes, fortes e consistentes (Barooni et al., 2023, C. Guedes. Soares, 2019). Nos últimos anos, reflexo deste crescimento significativo, o setor europeu da energia eólica *offshore* no Mar do Norte promoveu a investigação sobre esta tecnologia nas regiões atlânticas da Europa, com vários conceitos atualmente em aplicação (Figura 7): *WindFloat* (Roddier et al., 2010), *Hywind* (Skaare et al., 2014) e *FLOATGEN* (Beyer et al., 2015).



Figura 7. Exemplos de conceitos da tecnologia flutuante *offshore* em aplicação. a) *Hywind*; b) *WindFloat*; c) *FLOATGEN*.

As estruturas de apoio flutuantes podem ser classificadas com base no mecanismo primário adotado para cumprir os requisitos de estabilidade estática (Leimeister et al., 2018), sendo o principal fator de distinção entre os três grandes tipos existentes no mercado (Figura 8): *Spar-Buoy*; *Spar-Submersible*; *Tension leg platforms* (TLP's).

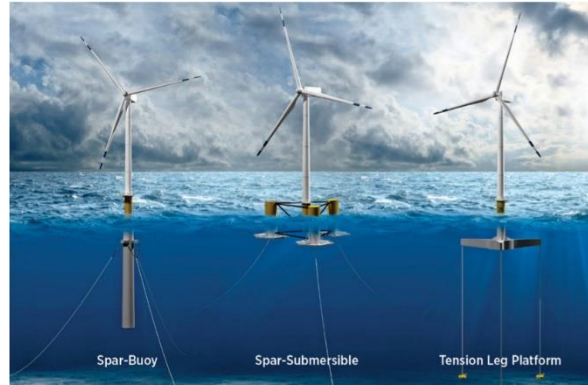


Figura 8. Tipos de plataformas *offshore* flutuantes, com base no mecanismo de estabilidade estática (Kreider et al., 2021).

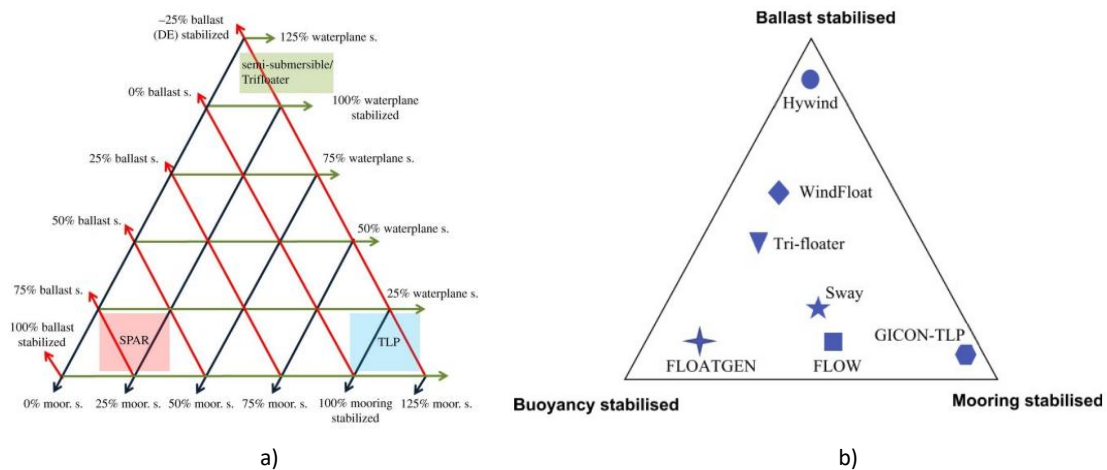


Figura 9. Estabilidade de plataformas flutuantes a) Definição das estruturas flutuantes de acordo com o triângulo de estabilidade (Leimeister et al., 2018); b) Enquadramento das FOWT no triângulo de estabilidade (Chitteth Ramachandran et al., 2022).

De acordo com o triângulo de estabilidade utilizado para definir este tipo de estruturas, as plataformas podem ser estabilizadas por lastro ou *ballast*, estabilizadas por flutuação ou *waterplane*, estabilizadas por amarração ou *mooring* ou através da combinação destas. É possível compreender o posicionamento dos diferentes tipos de estruturas flutuantes no triângulo de estabilidade (Figura 9) e de que forma esse posicionamento influencia a otimização da sua estabilidade. Por um lado, as *Spar-Buoy* são estruturas geralmente cilíndricas alongadas, preenchida com lastro (*ballast*) na parte inferior da estrutura, com a função de aumentar o peso e consequentemente a estabilidade. Além disso, é equipada com três cabos de amarração em catenária. O mesmo sistema de amarração é utilizado para as estruturas semi-submersíveis, como mostra a figura 8. Para obter uma estabilidade baseada no plano de água (*waterplane*), este tipo de flutuador é constituído por três colunas colocadas nos bordos de um triângulo. A turbina eólica é montada numa destas colunas ou suportada por uma quarta coluna no centro

do triângulo. Por último, as estruturas TLP são igualmente constituídas por colunas e pontões, diferindo no sistema de amarração. Este é composto por tendões verticais tensionados, que proporcionam estabilidade à estrutura (Kreider et al., 2021).

A tabela 3 sintetiza as principais características de cada tipo de plataforma flutuante, de forma a entender os parâmetros e condicionantes que cada tipo de estrutura cobre. Além disso, permitirá identificar vantagens competitivas entre os diferentes tipos de configuração.

Tabela 3. Características dos principais tipos de configuração de plataformas flutuantes (Aaron Du, 2021).

Tipologia	Configuração	Estabilidade	Profundidade	Instalação	Custo
<i>Semi-submersible</i>	Configuração complexa, estrutura de grandes dimensões	Menos estável	>40m	No cais	Baixo
<i>Spar</i>	Configuração mais simples, casco alto e de grandes dimensões	Boa estabilidade	>100m	<i>Offshore</i>	Elevado
<i>TLP</i>	Estrutura de pequenas dimensões	Boa estabilidade. Suscetível a cargas dinâmicas de alta frequência	>40m	No cais	Baixo

Não existe um eleito no que respeita à tipologia, sendo que cada conceito possui vantagens e desvantagens, que são muitas vezes ditados pelas condições específicas do local de implementação. No entanto, estudos afirmam que a plataforma semi-submersível é a tipologia mais utilizada mundialmente em detrimento das restantes tipologias (Aaron Du, 2021; Maktabi & Rusu, 2024). Este facto deve-se sobretudo pelas seguintes razões:

- O custo do sistema de ancoragem é inferior ao da TLP;
- O seu transporte e instalação são mais simples do que os outros dois conceitos;
- A turbina pode ser instalada *onshore* e rebocada para o local, evitando a instalação no mar, normalmente muito dispendiosa.

Embora os projetos eólicos *offshore* flutuantes não estejam tão estabelecidos como os de fundo fixo, têm uma capacidade potencial, segundo o *International Renewable Energy Agency*, de mais de 13 TW em águas profundas a nível mundial. Atualmente, as regiões líderes no desenvolvimento da energia eólica *offshore* flutuante são a Europa, os Estados Unidos, o Sudeste Asiático e a China. Na Europa, Noruega e o Reino Unido são os países líderes, com a França, Espanha, Itália e Portugal a intensificarem também os seus esforços para desenvolverem novos projetos. A energia eólica *offshore* flutuante está a ser explorada nos países e regiões da UE com águas profundas (entre 50 e 1 000 metros), com a perspetiva de que se abram novos mercados no Oceano Atlântico, no Mar Mediterrâneo e, potencialmente, no Mar Negro (International Renewable Energy Agency, 2024).

2.3 Recifes de Coral

Tendo em conta a maior preponderância da tecnologia flutuante na geração de energia renovável e com previsões de um crescimento exponencial na quantidade de energia que poderá vir a produzir, é desde já perentório que se reúnam forças de modo a colmatar as suas debilidades. Como foi abordado no subcapítulo 2.2, o impacto que a tecnologia flutuante *offshore* acarreta, nomeadamente no ecossistema onde se insere, é significativo. Deste modo, soluções como os CA surgem como um passo natural na mitigação de certos impactos associados sobretudo ao ecossistema marinho que rodeia os aerogeradores.

Os RC são estruturas naturais do ecossistema marinho, que servem de *habitat* a mais de 25% de biodiversidade marinha, constituindo ainda fonte de alimento a mais de 500 milhões de pessoas por todo o planeta (I. V. Matus et al., 2021). Atualmente, os RC ocupam cerca de 1% do fundo oceânico até hoje conhecido (Souter et al., 2020), havendo uma ligação intrínseca à diminuição crescente da sua população com os impactos ambientais que se vêm verificando por todo o globo. Ora, acredita-se que as condições ideais para que os RC possam coexistir esteja intimamente ligada a flutuações temporais e naturais das condições ambientais (Eddy et al., 2021). Infelizmente, estas condições estão, à data de hoje, a acelerar o desaparecimento destas espécies. Os corais estão entre as espécies mais frágeis e complexas do oceano (I. V. Matus et al., 2021), pelo que os impactos ambientais direcionados aos ecossistemas marinhos impactuam consideravelmente mais na sobrevivência destas espécies. Acredita-se que o aquecimento antropogénico dos oceanos, resultado do aumento da temperatura de efeito de estufa, tenha desencadeado um branqueamento em massa* (*coral bleaching*), reduzindo implacavelmente a extensão populacional de corais nos oceanos. Isto porque, quando as águas ficam demasiado quentes para os corais, estes libertam as suas microalgas com coloração, transformando-se num branco esquelético. Se estes eventos forem prolongados e/ou recorrentes, sem tempo de recuperação, pode ocorrer uma diminuição tal da complexidade estrutural (Figura 10) da espécie e consequente mortalidade da espécie (Souter et al., 2020). Além disto, pensa-se que fatores como a acumulação de poluição marinha e a sobrepesca, tenham um papel igualmente preocupante nestes dados populacionais (Eddy et al., 2021).



Figura 10. Representação da diminuição estrutural dos corais, resultado do *coral bleaching* (I. Matus, 2020).

*Branqueamento em massa – O aumento da temperatura da água faz com que os corais expulsem as algas (*zooxanthellae*) que vivem nos seus tecidos, fazendo com que o coral fique completamente branco (NOAA, 2024).

2.3.1 Recifes Artificiais

Em resposta ao declínio populacional que se vem verificando em relação aos RC, tem existido um esforço constante na criação de soluções que, por um lado, subsistam às condições desafiadoras dos oceanos, e ao mesmo tempo recriem as condições ideais para a prosperidade fundamental da biodiversidade. Este esforço convergiu em várias soluções que datam desde 1950, na criação dos designados CA (Firth et al., 2023). A atual investigação sobre os CA a nível mundial é apresentada na figura 11, o que demonstra a importância alocada no desenvolvimento destes produtos, na tentativa de colmatar as vulnerabilidades atuais dos RC perante condições de ecossistema transitórias. No que toca a este tema, há uma clara tendência para estudos de curta duração, que estão representados na imagem pelos pontos amarelos, significando, portanto, que a implementação de CA se situa ainda numa fase embrionária. Estes estudos salientam os principais resultados na resposta dos CA ao ecossistema, sendo exemplo disso as relações tróficas que estabelece, bem como o comportamento estrutural do mesmo.

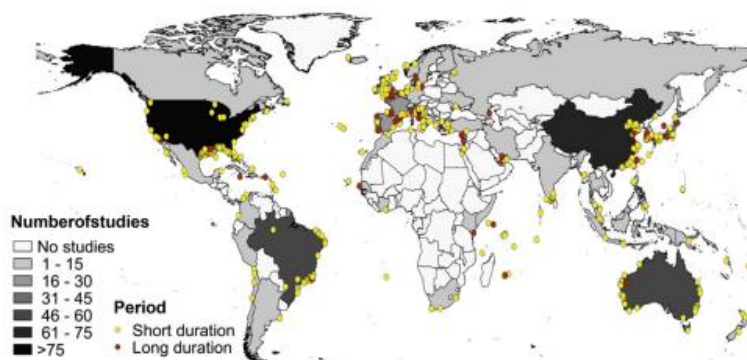


Figura 11. Distribuição global da investigação sobre recifes artificiais e desenvolvimento do período de estudo: curta duração (<2 anos) e longa duração (>2 anos) (Silva Lima et al., 2019).

De acordo com a *European Artificial Reef Research Network*, definem-se os CA como estruturas submersas capazes de oferecer um substrato para a prosperidade das espécies marinhas, com o objetivo de se recriar condições idênticas às dos recifes naturais (I. Matus, 2020). No entanto, o êxito da implantação dos CA depende das suas propriedades físicas e químicas, tais como a configuração, a composição do material, e a eficácia na atração de peixes (Han et al., 2023). Nas últimas décadas, a sua viabilização tem-se intensificado, assim como a exploração material necessária. A abundância de materiais usados e desperdiçados tem reduzido o custo associado à construção de CA (Chou, 1997), o que potencializa a sua exploração em países de primeiro e terceiro mundo. Materiais como o bambu, ligas marinhas e estruturas cerâmicas (I. Matus, 2020) são atualmente viabilizados como materiais para construção de CA.

Mediante a revisão de literatura, compilaram-se os principais modelos de CA projetados na Europa (Figura 12). Uma grande parte destes modelos procuram criar estruturas modulares, na tentativa de se otimizar processos de fabrico em larga escala. Nota-se também uma grande tendência para a inserção de cavidades, existindo já estudos que sustentam a ideia de que a existência de cavidades pode contribuir para a formação de fluxos turbulentos, que possui um efeito distinto no desempenho de agregação de espécies à estrutura (Z. Jiang, Liang, Zhu, et al., 2020).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

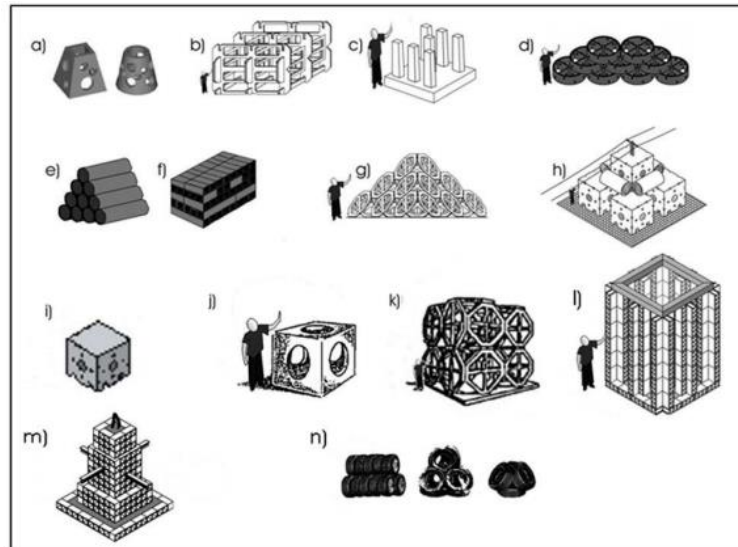


Figura 12. Compilação das principais geometrias utilizadas na concepção de CA (Fabi et al., 2011).

A grande maioria dos CA estão situados no fundo do mar, normalmente localizados em zonas de baixa profundidade (Luo et al., 2022a). No entanto, e apesar de todas as vantagens que oferecem, estão associados a ameaças tais como o desenvolvimento costeiro e potenciais poluentes oriundos da atividade humana. Um estudo bibliográfico de Luo (2022) relata vulnerabilidades de CA em localizações de contacto com fertilizantes tóxicos, evidenciando um aumento na produção de algas e uma maior incidência de surtos de coroa de espinhos. A produtividade de um sistema de coral é alimentada pela luz solar e fotossíntese associada em águas costeiras pouco profundas. Exemplo disso são as florestas de *kelp*, que raramente são encontradas a mais de 40 metros de profundidade. Desse modo, Valeriya (2022) defende que os corais que são colocados a profundidades superiores a 40m estão sujeitos a uma menor produtividade em termos de interação com outros níveis tróficos, afirmando que necessitam ser mantidos dentro da zona fótica para que possa exercer o seu papel no ecossistema da melhor forma (Valeriya Komyakova et al., 2022).

2.3.2 Recifes Artificiais Flutuantes

Apesar do mercado de CA estar largamente disseminado para soluções de fundo oceânico, o desenvolvimento das estruturas *offshore*, nomeadamente na cobertura de maiores profundidades, tem aberto caminho para a inclusão do fenómeno dos recifes que se desenvolvem neste tipo de plataformas. Deste modo, nasce um foco emergente no potencial dos Corais Artificiais Flutuantes, que permite o aproveitamento da sua inserção na zona fótica superior (Luo et al., 2022b) e com isso apoiar um desenvolvimento *offshore* mais sustentável do ponto de vista ambiental. Além disto, estas estruturas, fruto da sua localização, apresentam um excelente desempenho anti ondas e de corrente, menos restrições na geologia do fundo marinho e um modo de disposição viável de grupos multi corais (Han et al., 2023). Apesar destas vantagens promissoras, a investigação acerca desta tecnologia ainda se encontra numa fase inicial, havendo lacunas na avaliação dos materiais, configurações e eficácia que deverá ser considerado.

Tendo isto em conta, é fundamental clarificar as principais vantagens e desvantagens que qualifiquem ou desqualifiquem a sua utilização e viabilidade num projeto da dimensão atribuída à presente dissertação. Deste modo, tomou-se por base um estudo efetuado por Valeriya Komyakova et al. (2022), que enumera as principais características naquilo que é uma análise de risco na utilização destas estruturas a curto, médio e longo prazo. A informação encontra-se retratada na tabela 4.

Tabela 4. Análise de risco na utilização de estruturas de coral flutuantes (adaptado de (Valeriya Komyakova et al., 2022)).

Tipo de efeito	Consequência	Impacto
Poluição	Danos nos ecossistemas costeiros; ameaça para organismos marinhos (aprisionamento/emaranhamento, ingestão)	Médio
	Carga/descarga de nutrientes	Alto
Recetividade social	Oposição pública	Baixo
Biossegurança	Atração de espécies invasivas	Alto
	Introdução de doenças (através de microrganismos que atuam como reservatórios e amplificadores de agentes patogénicos)	Médio
Navegação	Obstáculo submerso	Baixo

2.3.3 Relações Tróficas com Biodiversidade

A ecologia desempenha um papel central na gestão e conservação dos ecossistemas, ao fornecer informações sobre as forças bióticas e abióticas que organizam e estruturam os ecossistemas (Rogers et al., 2014). No domínio marinho, as diretrizes para o estabelecimento e gestão sustentável de áreas marinhas protegidas são já frequentemente baseadas na ecologia. No entanto, embora a recuperação de muitos ecossistemas costeiros tenha incorporado estes princípios em projetos de restauração ecológica (Silliman et al., 2015), a restauração de corais tem demorado a adotar este enquadramento. Apesar disso, a ecologia trófica é vital para a compreensão destas espécies, uma vez que estão na base de processos fundamentais que determinam a sua estruturação em comunidades, bem como nos serviços que prestam aos ecossistemas (Mcleod et al., 2019; Parker & Burkepile, 2006).

Neste subcapítulo serão introduzidos alguns estudos e resultados deduzidos que determinarão algumas das principais interações tróficas envolvidas entre os corais e outras espécies marinhas relevantes. De notar que os resultados apresentados dependerão sempre de fatores determinantes como a localização, espécies marinhas envolvidas, espetro temporal, entre outros.

Um estudo conduzido (Ladd & Shantz, 2020) efetuou uma revisão de 519 estudos de restauração de corais dos últimos trinta anos de forma a identificar as principais interações tróficas consideradas pela comunidade científica. Os resultados relatam que apenas 15% das publicações consideraram este tipo de interações, evidenciando um claro desfasamento entre o papel fundamental da ecologia trófica nos RC e a sua consideração nos esforços de restauração.

Apesar disto, a interação mais considerada foi a herbívora, que é amplamente reconhecida como crítica para manter os recifes dominados por corais. Os herbívoros facilitam a colonização, crescimento e sobrevivência dos corais através do consumo de algas que competem com o coral por espaço, responsáveis pela transmissão de doenças e envenenamento do mesmo. Além disso, a herbivoria é fundamental para limitar a proliferação de macroalgas após grandes perturbações, para que os corais possam recolonizar os recifes (Adam et al., 2011; Holbrook et al., 2016).

As interações com peixes de menores dimensões, reconhecidos como *Damselfishes*, são também consideradas na cadeia trófica. Esta comunidade de peixes pode, por um lado, reduzir as taxas de crescimento dos corais, através da transmissão de doenças específicas para estas espécies (Casey et al., 2015). Por outro lado, ao abrigarem-se nos ramos dos corais, fornecem nutrientes benéficos diretamente aos seus hospedeiros coralinos. Além disso, o comportamento agressivo de algumas espécies afasta certos predadores de corais (coralívoro).

Por fim, é de realçar a relação entre zonas bentónicas e pelágicas. As espécies de peixes que se alimentam de plâncton constituem mais de 20% das espécies de peixes dos recifes, sendo um componente substancial das suas comunidades (Bellwood & Hughes, 2001; Sandin et al., 2008). São os principais importadores de nutrientes das zonas pelágicas, acoplando efetivamente as zonas bentónicas e pelágicas (Hamner & Wolanski, 1988). Este acoplamento bentónico-pelágico impulsiona até 40% da produtividade dos peixes em alguns locais de recife (Morais & Bellwood, 2019) e fornece uma fonte de alimento para níveis tróficos mais elevados (figura 13).

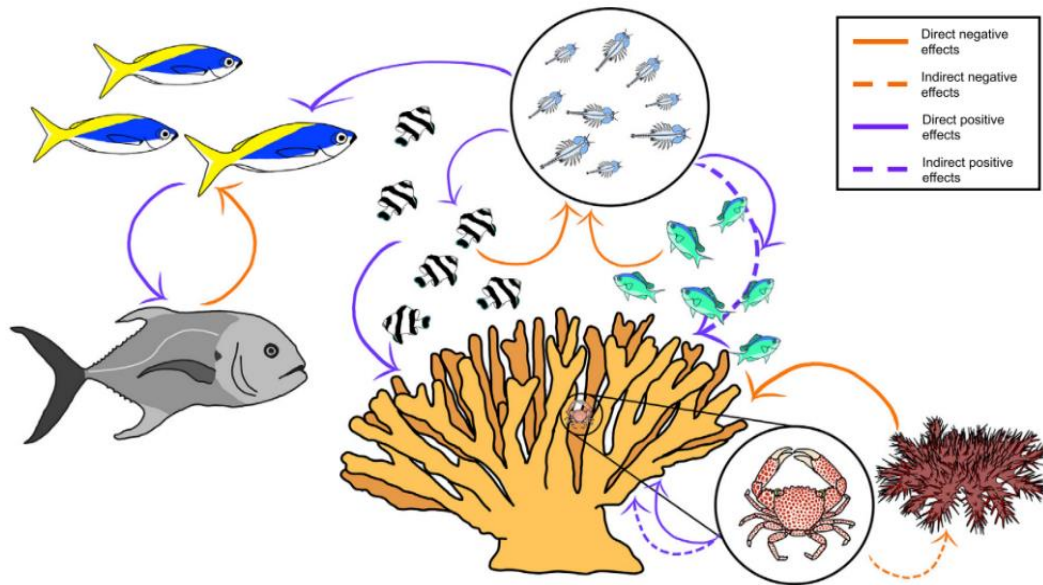


Figura 13. Representação ilustrativa das relações tróficas entre corais e comunidades de plâncton e peixes, e o tipo de influência (positiva ou negativa que possuem entre si (Ladd & Shantz, 2020).

Noutra vertente da temática, foi realizado um trabalho investigacional (Lemoine et al., 2019) em vinte e três recifes artificiais (Figura 14) ao largo da Carolina do Norte, Estados Unidos da América, através de monitorização com mergulhadores, de forma a avaliar o seu comportamento dentro da cadeia trófica. O objetivo primordial do estudo foi compreender a influência que o tipo de CA utilizado, de acordo com o material predominante e geometria, tem nas comunidades de peixes que se estabelecem ao redor da estrutura.

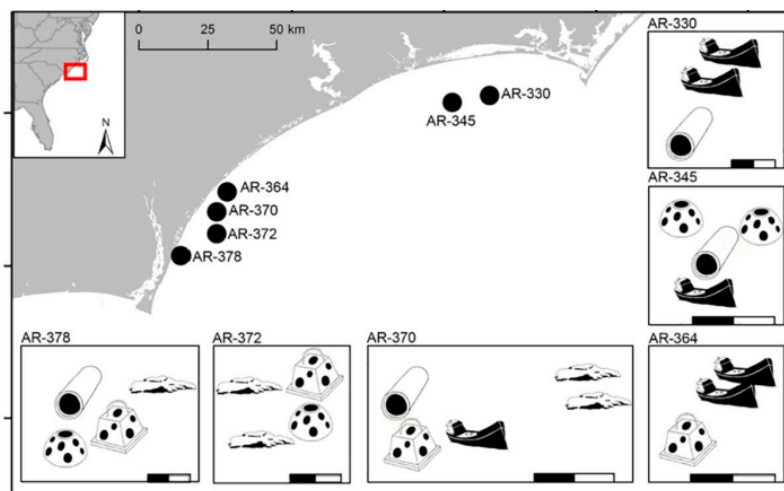


Figura 14. Disposição geográfica dos 23 recifes artificiais implementados ao largo da Carolina do Norte, fruto do trabalho de investigação de (Lemoine et al., 2019).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Os resultados foram muito conclusivos e revelaram que os diferentes tipos de CA (ilustrados na figura 15) obtiveram um desempenho único e característico, uma vez que abrigaram comunidades de peixes distintas. Os navios metálicos registaram a maior abundância de peixes. Estas estruturas suportaram comunidades de peixes diferentes das dos módulos de betão e dos recifes rochosos. Em contrapartida, os módulos de betão obtiveram um desempenho semelhante ao dos recifes rochosos, suportando uma abundância de peixes, biomassa e composição da comunidade semelhantes. Estes resultados sugerem que os gestores devem utilizar estrategicamente tipos específicos de recifes artificiais em função dos seus objetivos de conservação e gestão predeterminados relacionados com os peixes e o seu *habitat*.

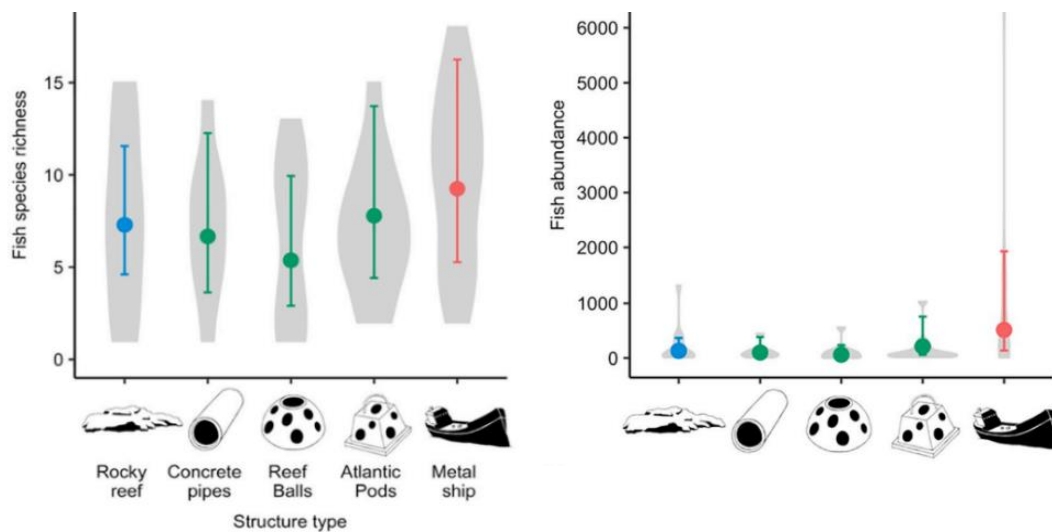


Figura 15. Desempenho dos quatro tipos de corais artificiais testados em termos de riqueza de biodiversidade e abundância (Lemoine et al., 2019).

2.4 Materiais de construção para CA

Após a clarificação contextual do aparecimento dos CA e da sua vertente flutuante como solução emergente no mercado, torna-se fundamental compreender o tipo de material que se adequa no momento de construção destas estruturas. Este irá definir um grande número de variáveis como a estabilidade dimensional, coesão estrutural, longevidade, compatibilidade, entre outros.

Uma grande variedade de materiais vem sendo utilizada na criação dos CA, notando-se uma tendência crescente para materiais sustentáveis e economicamente circulares. Entre eles encontra-se a utilização de rochas, pneus, cordas, redes, fibra de vidro e geotêxteis (Juliano Silva Lima & Ilana Rosental Zalmon, 2020). No entanto, estima-se que cerca de 40 % dos CA em todo o mundo tenha sido construído em betão, 20% em aço, 15% em rocha, 10% em borracha e os restantes através de materiais como cinzas, cerâmica, conchas, fibra de vidro e tijolo (AW Ramm et al., 2021). Embora os RA tenham sido produzidos a partir de uma série de materiais, um dos mais comuns é o betão - uma vez que pode ser utilizado para desenvolver formas e geometrias quase ilimitadas devido à sua trabalhabilidade antes do processo de cura (O'Reilly & Willerth, 2023). No entanto, devido a diferenças de pH, estima-se que possa levar meses para que o pH de estruturas de betão possam igualar o pH do oceano, estimado em 8,3. Para resolver os problemas de alcalinidade superficial e emissões elevadas, muitos estudos de CA examinam a eficácia de diferentes aditivos e cimentos alternativos para produzir alternativas mais ecológicas aos cimentos *Portland* típicos (Mat Jusoh et al., 2018).

AW Ramm (2021) relata no seu estudo analítico, onde foram recolhidas 804 publicações referentes ao tópico dos recifes artificiais, que 81,6% dessas publicações (Figura 16) referiam o principal material de construção utilizado. Parte dessa amostra inclui materiais de construção como o betão e o tijolo, bem como a incorporação de materiais naturais como as conchas.

Artificial reef characteristics
Dominant construction material (81.6%)
Ash
Brick
Ceramic
Concrete
Dead coral
Fibreglass
Mixed components
Other metal (e.g., aluminum)
Plastic
Rock (e.g., rubble, limestone)
Rubber (e.g., tires)
Shell
Steel
Wood

Figura 16. Materiais amplamente utilizados na conceção de recifes artificiais (AW Ramm et al., 2021).

Uma investigação levada a cabo pela *Blue Economy Cooperative Research Centre* relata que uma grande parte dos estudos efetuados a nível de impacto ecológico do material na otimização estrutural e funcional dos CA cingem-se apenas a um leque de amostra de corais situados a curta distância da costa. Além disso, relata-se ainda um curto espetro científico no estudo da relação entre o tipo de material utilizado e a sua influência na compatibilidade com a biodiversidade. Outros estudos concluíram que os efeitos do tipo de material utilizado são maiores para as espécies sésseis (organismos incapazes de movimento posicional autónomo), uma vez que estas interagem diretamente com o substrato do recife (Valeriya Komyakova et al., 2022).

Tendo toda esta informação em conta, efetuar-se-á uma compilação dos principais materiais de construção amplamente utilizados em projetos marinhos e proceder-se-á a uma avaliação individual segundo os seguintes critérios de avaliação:

Hidrofobia: O valor numérico do ângulo de contacto de uma gota em repouso sobre a superfície de um isolador é uma quantificação da hidrofobia do material (De Castro et al., n.d.). Tendo em conta que se abordarão materiais previamente compatíveis em ecossistemas marinhos, diferenciar-se-ão os materiais segundo um modelo de *Média* ou *Alta* hidrofobia.

Densidade: Avaliação da densidade do material segundo *Baixa*, *Média* ou *Alta* densidade.

Durabilidade: Avaliação deste parâmetro segundo *Baixa*, *Média* ou *Alta* Durabilidade.

Betão Tradicional

O betão é, atualmente, o material mais utilizado na construção de CA, sendo o material que oferece melhores condições de prosperidade num leque de aplicações mais alargado. Apesar de apresentar texturas mais pesadas quando comparado com materiais naturais, apresenta taxas mais elevadas de fixação e colonização de espécies.

Apesar da sua elevada taxa de utilização, o betão pode ser associado a algumas desvantagens na sua utilização. O cimento *Portland*, um dos principais materiais de construção utilizado em estruturas artificiais de betão marinho, possui um pH muito elevado (~13) quando comparado com a água do mar (~8) (Xu et al., 2019). Devido à forte alcalinidade, são necessários pelo menos seis meses para que o betão normal envelheça no oceano antes que o valor do pH na região da superfície iguale o pH da água do mar, o que poderá dificultar uma fixação da vida marinha numa primeira fase de implementação (Valeriya Komyakova et al., 2022). O betão utilizado nos recifes artificiais é geralmente uma gama especialmente criada para meio marinho, com alta resistência e misturado com micro-sílica, que equilibra o pH da estrutura (Florisson et al., 2018).

Tabela 5. Avaliação do betão de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.

Hidrofobia	Média/Alta
Densidade	Alta
Durabilidade	Alta

Betão Ecológico

O betão ecológico refere-se a um tipo de betão concebido para ter um impacto ambiental reduzido em comparação com o betão tradicional. Normalmente, incorpora materiais ou tecnologias alternativas, mas também através da variação das propriedades químicas, para dar resposta às preocupações relacionadas com o consumo de energia, as emissões de carbono e o esgotamento de recursos associados à produção convencional de betão.

Diversos estudos (Valeriya Komyakova et al., 2022) relatam um aumento de até 45% da eficácia deste tipo de betão em comparação com o tradicional, no que toca à atratividade de espécies alvo, e consequentemente uma redução da riqueza de espécies invasoras até 50%. Exemplo desta aplicação é na incorporação de conchas de ostras e conchas esmagadas de vieira-rainha na composição dos blocos de betão.

Apesar de algum sucesso no desenvolvimento de misturas de betão ecológicas e biogénicas, os estudos relatam que a alteração da complexidade/rugosidade da superfície parece ter impactos mais significativos na colonização de comunidades, do que a alteração das propriedades químicas do betão, uma vez que proporciona mais área de fixação, maior refúgio contra predadores e menor impacto da concorrência e de outros fatores de stress ambiental (Dodds et al., 2022).

Tabela 6. Avaliação do betão ecológico de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.

Hidrofobia	Alta
Densidade	Média
Durabilidade	Média/Alta

Cerâmica e argila

Tanto a cerâmica como a argila são dois materiais que surgem como alternativa viável e atraente ao betão ou aço na construção de estruturas marinhas. Os materiais cerâmicos não são tóxicos, têm pH neutro e podem ser construídos em vários modelos utilizando a impressão 3D (Muliawati et al., 2022). A argila, por sua vez, é uma opção natural para a produção destas estruturas e destaca-se por ser um material inerte, robusto, sustentável, com um baixo custo de produção e uma elevada taxa de compatibilidade com os organismos aquáticos.

Para além disso, os materiais cerâmicos podem estimular a metamorfose dos corais e são preferidos pelas algas coralinas, que se sabe terem um impacto positivo no aumento da colonização de corais e de outros organismos bentónicos (Levy et al., 2022). Este facto pode também levar a que os peixes colonizem mais rapidamente os recifes de cerâmica em comparação com os recifes de betão. Apesar destes benefícios, a argila continua a ser uma opção subutilizada para a construção de recifes artificiais.

Tabela 7. Avaliação da cerâmica de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.

Hidrofobia	Alta
Densidade	Alta
Durabilidade	Baixa

Tabela 8. Avaliação da argila de acordo com os critérios de avaliação estabelecidos.

Hidrofobia	Alta
Densidade	Baixa
Durabilidade	Média

Agregados

A elevada utilização de materiais cimentícios está associada às excelentes características que apresenta, como por exemplo: resistência à compressão, baixo custo e abundância dos materiais constituintes (Teixeira, 2018). A sua utilização em massa resultou em níveis alarmantes de desperdício de material, estando também associada a elevadas emissões de CO₂ para a atmosfera. A incorporação de agregados com materiais cimentícios surge na tentativa de promover uma utilização mais cuidada e controlado do cimento. Além disso, estima-se que a sua incorporação tenha uma influência significativa nas propriedades reológicas e mecânicas das argamassas e do cimento. A sua massa específica, a distribuição granulométrica, a forma e a textura da superfície influenciam marcadamente as propriedades das argamassas e do betão no estado fresco. Por outro lado, a composição mineralógica, a dureza, o módulo de elasticidade e o grau de alteração dos agregados afetam geralmente as propriedades das argamassas e do betão no estado endurecido.

O estudo de Fonseca e Matos (2023) analisou 157 misturas de betão impresso em 3D, classificando-as em quatro tipos com base nos materiais utilizados: 56 misturas com materiais convencionais (cimento, materiais cimentícios suplementares (MCS) padrão e agregados

naturais), 22 com MCS não convencionais (resíduos), 33 com agregados não convencionais, e 46 com areia reciclada de resíduos de construção e demolição (Figura 17).

Das 56 misturas com materiais convencionais, nove usaram apenas Cimento Portland (PC), enquanto as restantes foram combinações de dois ou mais constituintes. Cinzas volantes predominaram em 22 misturas, a sílica ativa foi usada em 19 misturas, e o filler calcário em 17. Outros MCS incluíram argila calcinada, escória de alto-forno, metacaulino e calcário-argila calcinada, em menor proporção (Fonseca & Matos, 2023).

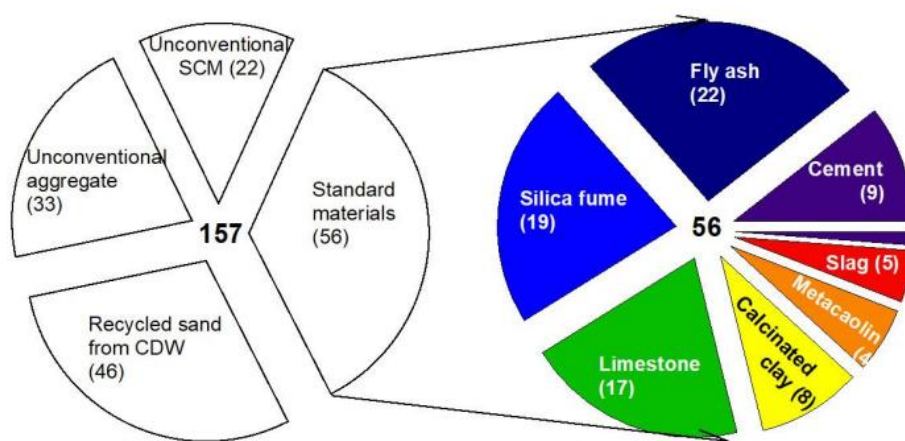


Figura 17. Materiais mais utilizados como aglutinantes em misturas de cimento (Fonseca & Matos, 2023).

Como já abordado anteriormente, o betão continua a ser o material mais utilizado na conceção de CA, aproveitando-se das suas características vantajosas. No entanto, a sua associação a desequilíbrios de pH com o meio marinho alavancou a incorporação de agregados nas suas misturas. Tendo em conta o contexto, surgiu a incorporação de diferentes tipos de agregados, como por exemplo resíduos de concha de ostra. A sua incorporação revela não só reduzir o teor do cimento na mistura, como também estima diminuir os seus níveis de pH, tornando-a mais atrativa para ecossistemas marinhos (Madhuwanthi Rupasinghe et al., 2023).

Tendo isto em conta, a inserção de matérias-primas sustentáveis representa, à data de hoje, a tendência do mercado dos recifes de CA, na procura pela mitigação dos danos ecológicos e na otimização da resposta com a interação animal. Além disso, a procura pressupõe cada vez mais a utilização de materiais compatíveis com processos de manufatura aditiva, onde se pode alcançar grande liberdade geométrica e otimizações no processo de manufatura do produto.

2.5 Fabricação Aditiva

Os mercados modernos impõem requisitos cada vez mais rigorosos aos processos de desenvolvimento e processos de produção. Para além dos requisitos para melhorar a qualidade do produto e o nível de flexibilidade no desenvolvimento e na produção, estão a ser impostos requisitos adicionais para reduzir os custos e, em particular, para encurtar os tempos de desenvolvimento e produção (Godec et al., 2022). Uma nova tendência que é cada vez mais visível em certos segmentos dos mercados é o abandono da produção em massa a favor da produção em pequena escala e, muitas vezes, individual (personalizada). Para responder a estas exigências do mercado, foram desenvolvidos e aplicados, desde a segunda metade dos anos 80, processos modernos de fabrico aditivo, ganhando cada vez mais preponderância nas últimas décadas.

Cleyde Mabota descreve a impressão 3D ou manufatura aditiva como um processo aditivo caracterizado pela deposição gradual em camadas numa base de impressão. Suporta a virtualização do produto, servindo de ponte entre *softwares* de modelação tridimensional e o produto físico (Cleyde Mabota, 2023). Estima-se que o uso desta tecnologia poderá reduzir até 35-60% do custo total de construção, entre 50-80% de custos associados a mão de obra e 50-70% de custo de produção (João Teixeira et al., 2022). Esta tecnologia reduz os condicionalismos da conceção dos produtos através da sua flexibilidade, redução do tempo e custo de fabrico, maior autonomia e da sua capacidade em produzir formas com geometrias de maior complexidade. A programação e modelação numérica permitem otimizar os diferentes elementos a serem produzidos e, dessa forma, utilizar a matéria-prima de forma eficiente, gerando um mínimo de resíduos (Boukhelf et al., 2022).

Quando comparado com procedimentos convencionais de construção (Figura 18), é possível observar que, à medida que a complexidade (geométrica e funcional) do produto aumenta, os custos de desenvolvimento e produção com a abordagem convencional aumentam exponencialmente. Assim sendo, pode concluir-se que a justificação para utilizar processos de fabrico aditivo aumenta com a complexidade do produto (Godec et al., 2022).

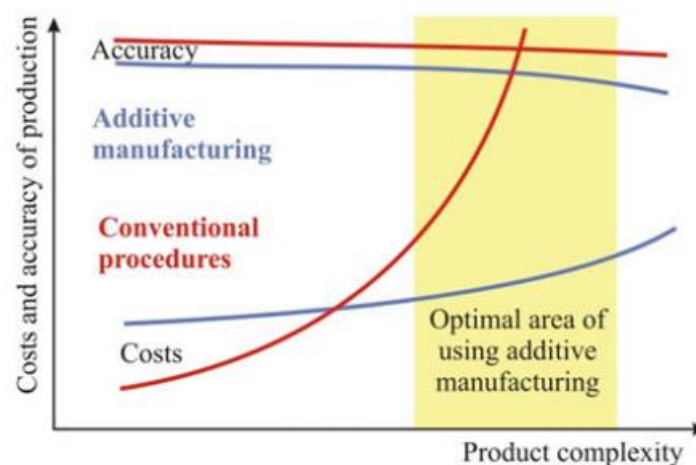


Figura 18. Comparação da manufatura aditiva com procedimentos convencionais, em termos de complexidade de produto, precisão e custos (Godec et al., 2022).

Vários métodos de manufatura aditiva foram desenvolvidos, resultando num total de sete categorias (Figura 19) de processos, definidas pela norma ISO/ASTM 52900:2015. Estas diferem entre si pela ampla gama de materiais utilizados, bem como no estado no qual se pretende trabalhá-los (líquido, sólido ou gasoso).

Os processos são classificados da seguinte forma:

- *Binder Jetting*;
- *Directed Energy Deposition*;
- *Material Extrusion*;
- *Material Jetting*;
- *Powder Bed Fusion*;
- *Sheet Lamination*;
- *Vat Photopolymerization*.

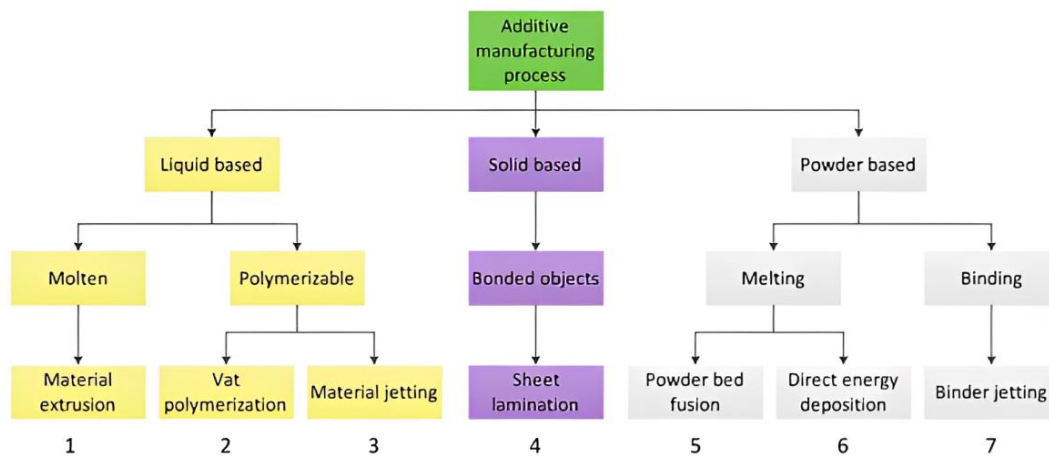


Figura 19. Classificação do fabrico aditivo de acordo com a norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM) (Godec et al., 2022).

Há várias iniciativas que propõem diferentes *designs* de formas. No entanto, as informações relativas à conceção, aos materiais utilizados e à caracterização do local de implantação são ainda muito escassas. A impressão 3D é uma tecnologia que tem vindo a ser progressivamente introduzida no setor da construção. Em particular, a tecnologia baseada em sistemas de materiais extrudidos (EMS) apresenta uma maior versatilidade do que a baseada em sistemas baseados em pó (PBS), ajudando a obter elementos tridimensionais maiores. Outra vantagem dos sistemas EMS vs PBS é que no primeiro, a argamassa é previamente misturada, garantindo assim a hidratação do cimento. Nos sistemas PBS, por sua vez, as gotas de água são pulverizadas sobre uma camada de argamassa seca sem a misturar posteriormente. Isto implica que nem sempre é garantida uma hidratação adequada do cimento, o que pode levar a uma redução da resistência (Yoris-Nobile et al., 2023).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

De acordo com o que foi relatado por Chou, quanto maior for a complexidade textural do coral artificial, maior será a sua capacidade de atrair espécies marinhas e estabelecer relações tróficas com as mesmas (Chou, 1997). Uma nova abordagem de construção destas estruturas vem surgindo e utiliza a impressão 3D como ferramenta de construção, de modo a replicar a complexidade característica destas espécies. A necessidade de se criar estruturas altamente especializadas, na tentativa de otimizar a sua relação com as espécies marinhas, sugere que a concepção e construção de CA está a evoluir para um processo construtivo altamente personalizável (Luo et al., 2022a), de modo a corresponder às condições ambientais locais.

Tendo isto em consideração, foi recentemente desenvolvido um processo de impressão 3D que se adequa à construção destas estruturas. Pela crescente utilização de materiais alternativos na composição dos CA, foi necessário desenvolver um método de impressão adequado a este tipo de misturas.

Impressão 3D por Deposição de Material Líquido (LDM)

Vinda do termo inglês *Liquid Deposition Modeling*, esta é a tecnologia que o fabricante de impressoras 3D Delta Wasp utiliza para a sua extrusora para materiais cerâmicos e representa um processo alternativo de impressão 3D, podendo ser utilizada para processar uma grande variedade de materiais pastosos como a argila, o barro, entre outros.



Figura 20. Ilustração do processo de impressão 3D LDM, com impressora Wasp (3D Bonum, 2020).

A extrusora LDM Wasp (Figura 20) baseia-se num sistema pneumático no qual uma bomba envia o material em pasta para o braço de deposição. Graças à combinação de uma extrusora de parafuso e de uma extrusora de pressão, pode atingir um nível de precisão muito próximo do das extrusoras de polímeros. Com esta tecnologia, é possível controlar com precisão o fluxo de material e também utilizar a retração para interromper a deposição (VoxelMatters, 2024).

Tabela 9. Vantagens e desvantagens da utilização do processo LDM (VoxelMatters, 2024).

Vantagens	Desvantagens
Procedimento de baixo custo	Resolução de camada limitada
Vasta gama de materiais disponíveis	Geometria limitada da peça
Capacidade de peças de tamanho muito grande	Dificuldade de operação

Aplicações de impressão 3D em Recifes Artificiais

A implementação de CA envolve a avaliação de uma série de variáveis, que viabilizam ou não a sua utilização como meio de restauração da biodiversidade marinha. A utilização de técnicas de fabrico aditivo, tais como a impressão 3D, tem o potencial de substituir por completo o modo como se constroem estas estruturas, e dessa forma viabilizar a escalabilidade de projetos deste tipo.

Nesta secção foram compilados diversos projetos que contribuem para a revisão bibliográfica em 3 vertentes:

-Morfologia: Identificação de traços visuais de forma e contorno que se diferenciem segundo organicidade e geometria (I. Matus, 2020); diferenciar-se-á segundo uma conformação natural e geométrica.

-Configuração: Identificação da modularidade ou individualidade do protótipo;

-Textura: Identificação de incongruências texturais que promovam a fixação de espécies na estrutura, definindo-se entre estruturas de *Alta Captação* (elevada heterogeneidade e elevado número de cavidades, intencionalmente criados para uma maior área de superfície) ou *Média-Baixa Captação*.

2.6 Estudo de Mercado

Reef Arabia (2012) - Barém

O projeto *Reef Arabia* (Reef Arabia, 2012) foi projetado por membros especialistas da *Sustainable Oceans International* (SOI) da Austrália, e contempla uma série de soluções de CA, com o objetivo primordial de restaurar *habitat* marinho que se houvera perdido ou deteriorado, fruto de atividades furtivas como a sobrepesca, modificações costeiras, turismo descontrolado, entre outros. Uma dessas soluções centra-se na elaboração de recifes entre os 20kg e as 9 toneladas, através da utilização de um tipo de betão marinho de alta resistência com vida útil prevista superior a 100 anos. Este material é inerentemente alcalino e, por isso, foram incorporados na conceção vários processos com o objetivo de neutralizar o pH da estrutura. Estas estruturas, por sua vez, carecem da organicidade e complexidade geométrica representativa da estrutura anterior.



Figura 21. Range de soluções de CA contempladas no projeto Reef Arabia (Reef Arabia, 2012).

O projeto pioneiro em termos produtivos, concebido em 2012, foi fabricado através de um processo de *Binder Jetting*, o processo *D-Shape* (construção em grande escala), usando uma mistura de material de arenito patenteado e não tóxico para a construção de estruturas-piloto com 498 kg e 1 m de altura que foram afundadas ao largo da costa do Barém. A utilização deste material substituiu o betão porque o arenito está mais próximo da rocha natural da terra e porque tem uma superfície de pH neutro que favorece a fixação das larvas (Cosgrove, 2016).



Figura 22. Manifestação de resultados positivos em relação à deposição de microrganismos e atração de peixes (Cosgrove, 2016).

Tabela 10. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Reef Arabia.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X			X	X	

Mars (2013-2018) - Maldivas

O projeto Mars (*Modular Artificial Reef Structure*) foi desenvolvido pelo *designer* Alex Goad, fundador da *Reef Design Lab* (Reef Design Lab, 2019), e projeta estruturas tridimensionais modulares de CA com o objetivo primordial de atenuar os efeitos adversos da erosão na biodiversidade e na integridade das regiões ecologicamente sensíveis. São estruturas especialmente pensadas para facilitar a sua implementação a pequenas embarcações e mergulhadores, eliminando por completo a necessidade de maquinaria pesada.

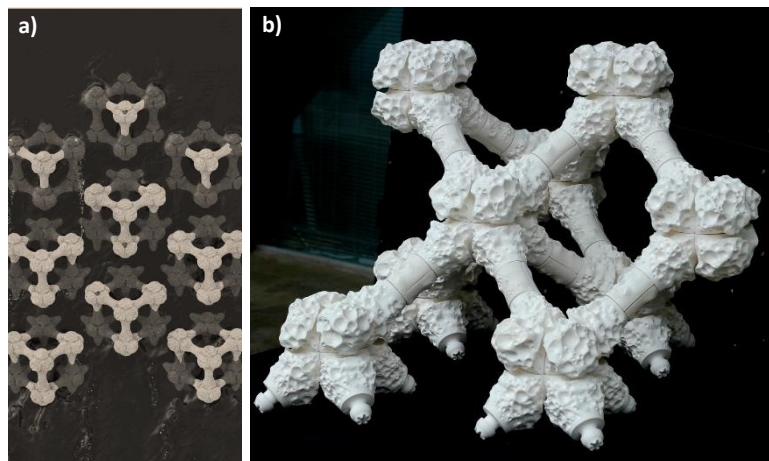


Figura 23. Projeto Mars. a) Modularidade do projeto; b) Conexão entre módulos (Reef Design Lab, 2019).

Cada unidade tem uma geometria de superfície especialmente concebida para incentivar o recrutamento natural de corais juvenis e para facilitar a fixação dos corais transplantados. Além disso, o seu *design* permite uma configuração personalizável (Figura 23 a)), adaptada a ambientes específicos, em forma e tamanho, criando um sistema de recifes mais forte e natural. O processo de fabrico implica a impressão 3D das superfícies, criando moldes cerâmicos (processo de fundição por deslizamento), que são sucessivamente preenchidos com betão marítimo e armaduras de aço.

Os resultados permitiram observar a atração de espécies bentónicas (Figura 24) que se refugiaram na estrutura, havendo uma colonização posterior de outros micro-organismos. As espécies que dependem da luz solar, como os corais e algas marinhas, aderiram nas superfícies superiores, enquanto esponjas se agarram a zonas interiores. Crustáceos e peixes mudaram-se para o coral, quando a cobertura de plantas se tornou mais robusta.



Figura 24. Resultados da deposição do coral no fundo oceânico, revelando bons índices de colonização de espécies (Reef Design Lab, 2019).

O projeto em causa aborda a questão da modularidade na intervenção em CA como medida de ação para a estimulação da biodiversidade de ecossistemas marinhos. A modularidade permite a criação de ínfimos micro-*habitat* internos através de cavidades irregulares profundas, onde é possível testar as melhores configurações em termos de compatibilidade animal (Perricone et al., 2023).

Tabela 11. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Mars.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X		X		X	

The Octopus's Gardener (2018) - Indonésia

Este projeto é uma iniciativa da *Coral Restoration Foundation* que teve como principal objetivo mitigar o branqueamento em massa que se fazia sentir nos recifes das Ilhas Gili, Indonésia. A iniciativa passa por colocar agregados de corais que se encontram em processo de branqueamento, e amarrá-los a árvores metálicas flutuantes.

Para isto, a estrutura (Figura 25), constituída por barras de metal dobradas e soldadas, é eletricamente carregada e, através do processo de eletrólise, toda a estrutura fica ionicamente carregada, alterando o pH da mesma. Isto significa que o metal passa a atuar como um ímã na água salgada, atraindo nutrientes e minerais que revestem o metal nu. Com isto, camadas de um novo material designado por *biorock* começam a formar-se, com uma composição quase idêntica ao calcário. Desta forma, recria-se um sistema biológico já existente e possibilita-se a sua utilização para a restauração e propagação de novos corais.

Com menos energia a ser desperdiçada na regulação do seu pH interno, os corais ficam livres para se concentrarem na produção de esqueletos fortes. Estima-se que haja um crescimento entre 3 a 5 vezes mais rápido, dependendo da espécie de coral. Graças ao aumento dos nutrientes disponíveis para ajudar a atenuar a perda de energia causada pelo stress térmico, dados revelaram que os corais transplantados revelaram ser mais resistentes aos eventos de branqueamento. Outros dados revelam que mais de 120 estruturas de *biorock* foram construídas ao largo da Ilha, com a mais variada tipologia imersiva (Lawson Liberty, 2018).



Figura 25. Propagação e restauração de corais através de estruturas *biorock* (Lawson Liberty, 2018).

Living seawalls (2018) - Austrália

O projeto de conservação oceânica *Living seawalls* foi desenvolvido pela *Volvo Car*, o Instituto de Ciências Marinhas de Sydney, o *Reef Design Lab* e o *North Sydney Council*. Este projeto consiste na instalação de painéis modulares nas paredes da costa do porto de Sydney. Estes foram concebidos com o intuito de mitigar alguns dos impactos ambientais que se faz sentir no meio marinho, beneficiar a biodiversidade da zona, aumentar a sensibilização para o ambiente marinho e contribuir para a limpeza dos oceanos.

O projeto passou pela produção e instalação de dez tipos distintos de estruturas modulares hexagonais de 55x55cm² (Figura 26 a)). Para isto, é feito um molde reutilizável a partir do painel impresso em 3D. A partir deste molde, os painéis de betão podem ser moldados e fabricados em grandes quantidades. Atualmente, a *Living Seawalls* tem dez *designs* de painéis de *habitat* (Figura 26 b)), cada um visando diferentes características de linhas costeiras naturais que beneficiam diversos grupos de organismos marinhos.

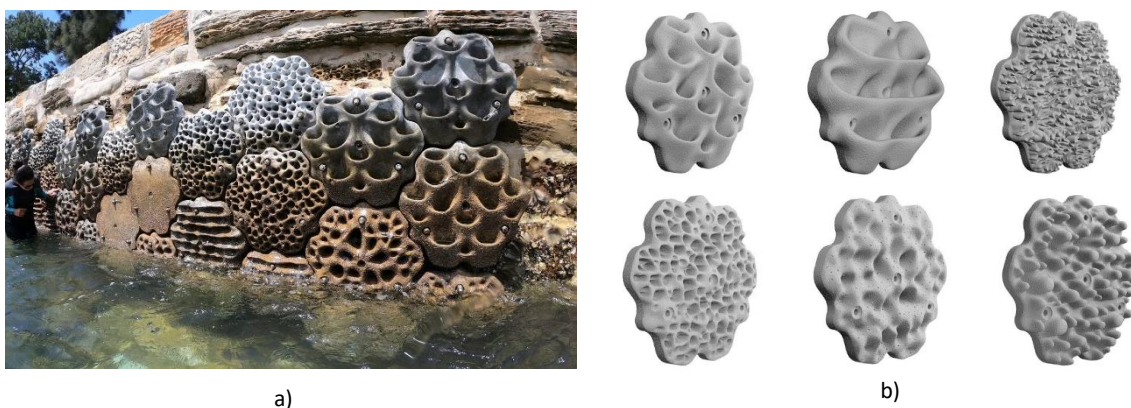


Figura 26. Painéis modulares *Living Seawalls*. a) Morfologia do painel; b) Diferentes tipologias dos painéis.

Dados da *Reef Design Lab* revelam que, após um a dois anos da instalação dos painéis, estes suportariam desde logo 36% mais espécies em relação aos painéis simples e não modificados com 85 espécies de invertebrados, algas e peixes a viver e a crescer nos painéis (Figura 27). Além disso, a empresa relata que denota uma maior congregação de comunidades de peixes à volta destes painéis, cerca de dois anos após a sua instalação (Reef Design Lab & Sydney institute of marine science, 2024).



Figura 27. Resultados demonstrativos da instalação dos painéis *Living Seawalls* (Reef Design Lab & Sydney institute of marine science, 2024).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Uma ramificação deste projeto inclui a incursão da *Volvo Car* na elaboração de painéis através da impressão 3D FDM (Yalcinkaya Gunseli, 2019). Este projeto, por sua vez, passou pela produção e instalação de 50 substratos modulares hexagonais de 55x55cm² (Figura 28), com cavidades e recessos projetados na superfície para imitar a estrutura das raízes de mangal (ecossistema costeiro de transição entre os biomas terrestre e marinho). A complexidade característica desta árvore, foi utilizada como conceito para o fabrico dos módulos. Os azulejos foram fabricados por impressão 3D FDM numa impressora convencional, para o posterior fabrico do molde para betonagem.

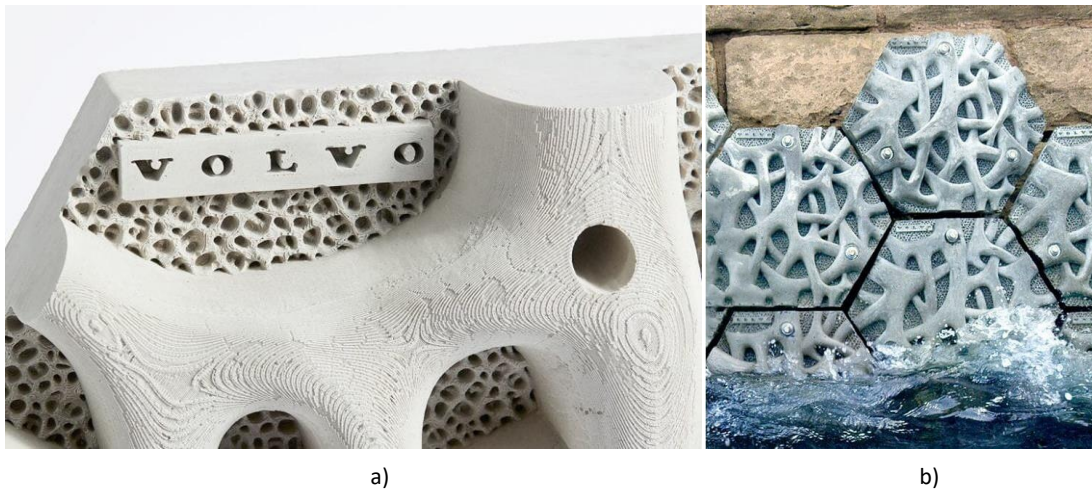


Figura 28. Paineis *Living Seawalls* com *Volvo car*. a) Estrutura final fabricada em betão; b) Disposição modular dos painéis (Yalcinkaya Gunseli, 2019).

Tabela 12. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto *Living Seawall*.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X		X		X	

Great Barrier Reef (2018-2021) – Austrália

O Coral Nurture Program é uma parceria entre investigadores e operadores turísticos para desenvolver uma nova gestão baseada na "administração" de locais de elevado valor económico da zona da Great Barrier Reef (GBR). Programa projetado para transformar, ecológica e socialmente esta localização através de ações diretas no processo de restauração ambiental da zona, bem como na atuação a nível de impacto social. Visa ainda, através de um leque particular de ações, mitigar efeitos climáticos que se fazem sentir sobretudo na capacidade de resistência dos recifes em eventos de stress.

Para isso, o programa tem desenvolvido, de forma bem-sucedida, programas de restauração baseados em transplante de corais ao longo da zona GBR. Este processo conta, numa fase primária, com a recuperação em massa de partes de corais não afetadas, em diversas zonas sujeitas a diferentes tipos de stress. De seguida, as amostras de coral recuperado são implantadas em zonas específicas destinadas à restauração e monitorização das mesmas. O desenvolvimento, por parte da organização, do sistema de fixação CoralClip (Figura 29 c)), permite a fixação duas vezes mais rápida e mais económica em relação aos métodos tradicionais, contribuindo para uma taxa de sobrevivência dos corais plantados de 85%.

Resultados demonstram taxas de sucesso de regeneração dos corais implantados. Imagem desse sucesso conta com a culturação de cerca de 25 000 corais fixados, durante 18 meses, em áreas sujeitas a stress térmico, tendo as observações efetuadas dado conta de que 85% da amostra total tinha regenerado com sucesso (Figura 29 a) e b)).



Figura 29. Programa de restauração da GBR, através da implantação de corais (Coral Nurture Program, 2024). a) Processo de implantação e Monitorização de agregados de coral; b) Sistema de fixação CoralClip.

Tabela 13. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto GBR.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
	X	X		X	

Buoyant Ecologies Float Lab (2019-2022) – Estados Unidos da América

O *Buoyant Ecologies Float Lab* é um projeto pioneiro concebido pelo *Architectural Ecologies Lab* do *California College of the Arts* e consiste num protótipo de um novo tipo de infraestrutura costeira resiliente ancorado em Oakland durante um período de três anos. Este projeto tem o objetivo de enfrentar os desafios climáticos, testando soluções para a melhoria do *habitat* marinho e a atenuação da erosão costeira.

Para isto, a equipa designada concebeu uma estrutura flutuante que serve simultaneamente de plataforma de investigação e de projeto de demonstração. Construída com um casco composto de polímero reforçado com fibra, ecologicamente otimizado, a estrutura de 227 Kg incorpora 550 Kg de balastros de betão para flutuabilidade. O *design* inovador, influenciado pelas diferentes necessidades do *habitat*, suporta um conjunto diversificado de criaturas marinhas, incluindo briozoários, vermes tubulares, esponjas, caranguejos e muito mais. Os picos e vales da estrutura criam piscinas de maré, promovendo a diversidade ecológica e reforçando a cadeia alimentar marinha.

Com o objetivo de atenuar a ação das ondas e reduzir a erosão costeira, o Laboratório de Flutuação incorpora uma pequena bomba de irrigação para criar piscinas de maré, alimentada por painéis solares. As bombas de esgoto, ativas por interruptores de boia, evitam a acumulação de água no interior. Os planos futuros envolvem a instalação de dispositivos de monitorização, tais como sensores de temperatura e turbidez, para melhorar a compreensão do impacto da estrutura. Em termos gerais, o projeto representa um protótipo de vanguarda que combina *design*, fabrico digital e ecologia marinha para conceber uma arquitetura adaptativa para resiliência climática (Marcus Adam et al., 2019).

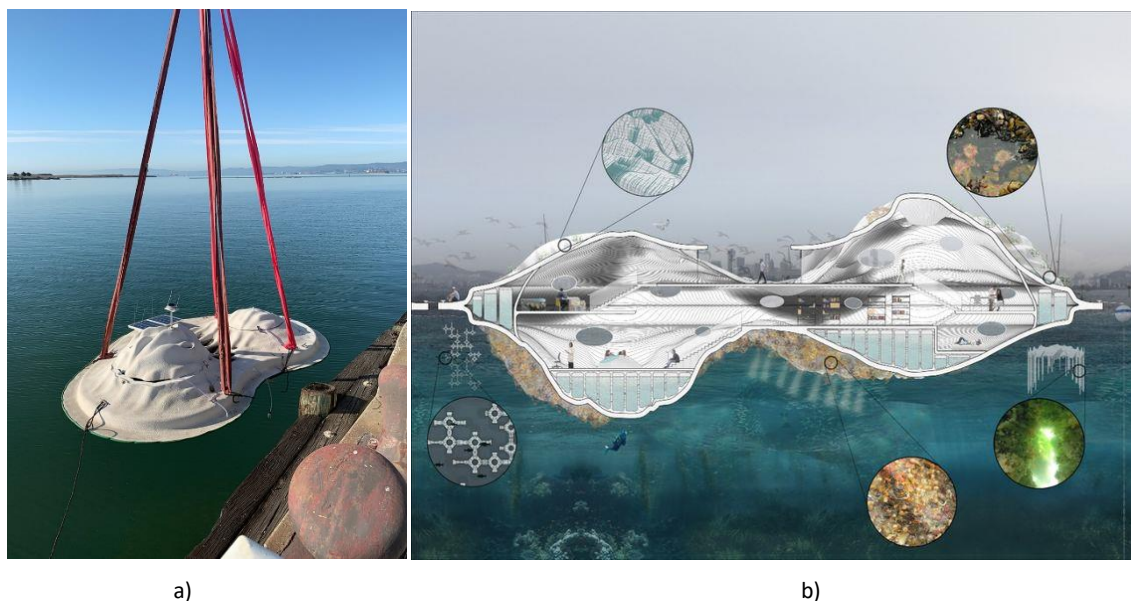


Figura 30. Projeto *Buoyant Ecologies Float Lab*. a) Implantação da estrutura no mar; b) Conceito do projeto (Marcus Adam et al., 2019).

Tabela 14. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
x			x	x	

3DPare (2019-2020) - Portugal

O projeto 3D Pare (Interreg, 2021) foi desenvolvido por uma equipa de investigadores do Centro Interdisciplinar de Investigação do Mar e Ambiente em colaboração com a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e outras entidades da área. O projeto está a trabalhar na implementação e monitorização de blocos de CA no oceano Atlântico, concebidos e fabricados através de tecnologia de impressão 3D a partir de materiais bio recetivos, com o objetivo de desenvolver ecossistemas marinhos mais sustentáveis, através de um crescimento de taxas de bio colonização nestas estruturas.

Para isto, foram desenvolvidos mais de 50 testes de argamassa distintos, onde se explorou diferentes combinações materiais e a sua potencialização de extrusão, entre eles areia de concha esmagada, areia de vidro ou geopolímero como ligante. Este último é feito de alumina-silicatos, reagentes alcalinos como o hidróxido de sódio ou o hidróxido de potássio, e água. Foram também utilizados outros materiais, nomeadamente uma escória de alto-forno granulada moída cimento CEM III e areia calcária.

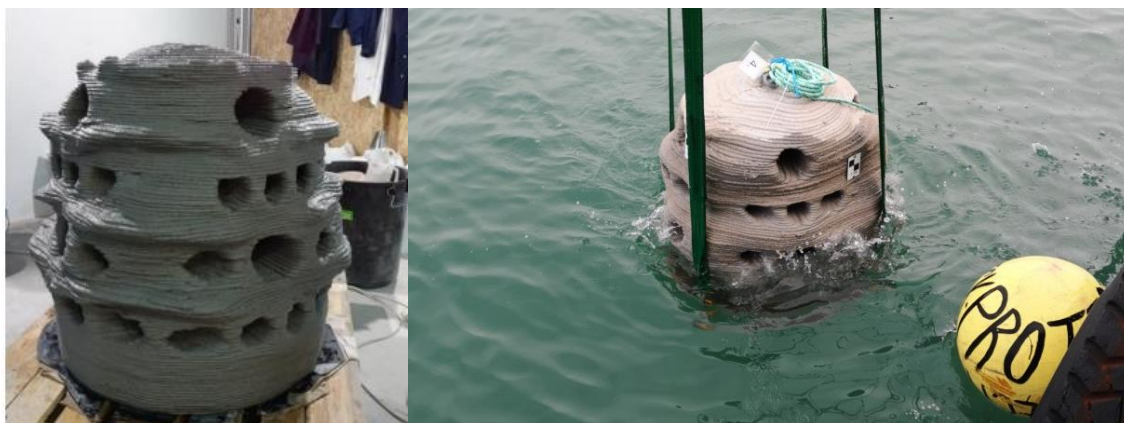


Figura 31. Fabrico e implementação do recife artificial em *Pool Bay*, costa sul de Inglaterra (Bournemouth University, 2019).

Os testes de campo demonstraram uma migração de mais de quarenta espécies para os inúmeros alojamentos que o coral artificial oferece, incluindo muitas espécies de algas marinhas, organismos que se alimentam por filtração, caranguejos e peixes. O local é popular entre os juvenis de muitas espécies de peixes, pelo que os blocos de CA podem estar a funcionar como um *habitat* de viveiro.

Sempre que as unidades de recife são inspecionadas, são registadas novas espécies e, após dois anos debaixo de água, o recife artificial suportava mais de cem espécies, incluindo ostras nativas raras, cujas populações diminuíram mais de 95% desde meados do século XIX. Grande parte do trabalho efetuado consistiu em verificar se certas espécies de vida marinha têm preferências pelo tipo de *habitat* incluído nas unidades de CA, onde se verificou a preferência das espécies de caranguejos (Figura 32 b)) pelos buracos e a preferência dos peixes pelos túneis (Bournemouth University, 2019).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes



Figura 32. Resultados do projeto, após dois anos da implementação (Bournemouth University, 2019). a) Deposição variada de espécies na estrutura ao fim de dois anos; b) Deposição de espécies de caranguejos nos buracos da estrutura.

Tabela 15. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto 3DPARE.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
x			x		x

Rethinking Artificial Reef Structures through 3D Clay Printing (2020) – China

O projeto em questão foi concebido numa colaboração entre o Laboratório de Fabrico Robótico, a Faculdade de Arquitetura da Universidade de Hong Kong e o Instituto *Swire* de Ciências Marinhas da Universidade de Hong Kong. Este consiste na impressão 3D de corais em argila e tem como propósito a mitigação de uma das principais ameaças a estas estruturas, a acumulação de sedimentos. Outro dos objetivos incluiu o estudo de monitorização da implantação de 3 espécies de coral na estrutura, nomeadamente *Acropora*, *Platygyra* e *Pavona*.

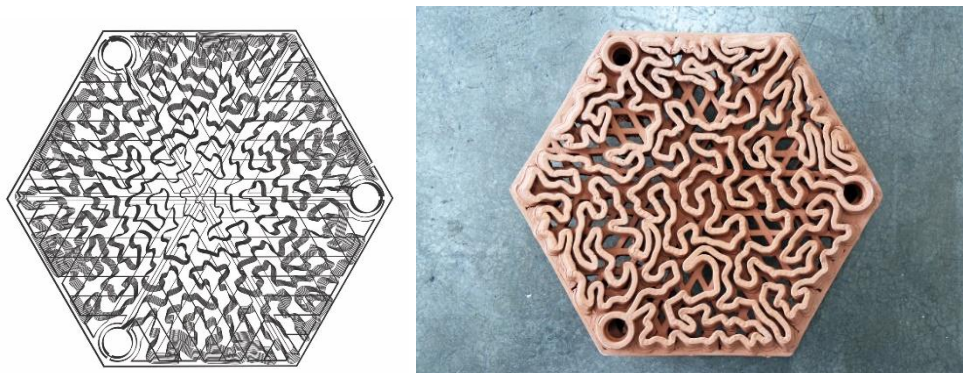


Figura 33. Processo construtivo da estrutura (Eduardo Souza, 2020).

O *design* foi inspirado nos padrões típicos dos corais e integrou vários aspetos performativos que abordam as condições específicas das águas de Hong Kong. As estruturas foram colocadas em três locais distintos do parque, que incluem *Coral Beach*, *Moon Island* e numa baía abrigada perto do centro de educação da vida marinha da WWF. A execução do projeto contou com a produção de 128 peças de azulejos de recife com um diâmetro de 0,6m, cobrindo cerca de 40m² no total. Estas peças foram impressas através de um método robótico de impressão 3D com argila de terracota genérica e depois cozidas a 1125 °C. Os fragmentos de coral foram plantados em julho de 2020 e a experiência será monitorizada durante os próximos anos (Eduardo Souza, 2020).



Figura 34. Recife artificial em argila. a) Método de disposição modular das estruturas; b) Implantação de fragmentos de coral na estrutura como objeto de monitorização (Eduardo Souza, 2020).

Tabela 16. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X		X		X	

Floating Reef (2022-2026) – França

O projeto *Floating Reef* foi levado a cabo pela *Pure Ocean* e visou o desenvolvimento de uma estrutura submersa flutuante sustentável e de concepção ecológica no mar Mediterrâneo, com o objetivo de mitigar os danos ecológicos oriundos de práticas agressivas ao ecossistema, nomeadamente a ancoragem de navios. Além disso, visa ainda desenvolver uma boia de amarração bio mimética mais ecológica, como forma de colmatar as debilidades concetuais das atuais soluções do mercado. Uma grande maioria provém ainda da indústria petroquímica e requer uma manutenção regular de forma a resistir aos raios ultravioleta e à incrustação. A evolução deste projeto dividiu-se em três fases, sendo que a terceira fase representa os desenvolvimentos finais da estrutura, de acordo com as falhas detetadas nos modelos prévios.

O primeiro modelo (Figura 35 a)) foi inicialmente concebido em betão impresso em 3D, pensado para recriar a organização interna das esponjas *Ascon*. Esta estrutura pretendia maximizar a taxa de colonização de vida marinha na superfície, assegurando ao mesmo tempo a sua viabilidade ecológica (trocas gasosas, fornecimento de nutrientes, entre outros).

O segundo modelo (Figura 35 b)) é uma representação menos complexa do primeiro modelo, tendo-se substituído a estrutura de betão para uma esfera de estrutura metálica. A flutuabilidade é assegurada por rolhas contidas num conjunto de redes provenientes da reutilização de resíduos da pesca local. Este modelo, por sua vez, é inspirado nos pólipos de coral do Mediterrâneo e proporcionam abrigo para pequenos invertebrados e peixes de menores dimensões.

Finalmente, o terceiro modelo (Figura 35 c)) utiliza módulos de bio polímero em detrimento da estrutura metálica, deixando a estrutura mais leve. As rolhas estão agora alojadas em vários módulos, com um sistema de montagem que solidifica toda a estrutura, permitindo ao mesmo tempo que a água flua através do recife (Pure Ocean, 2022).

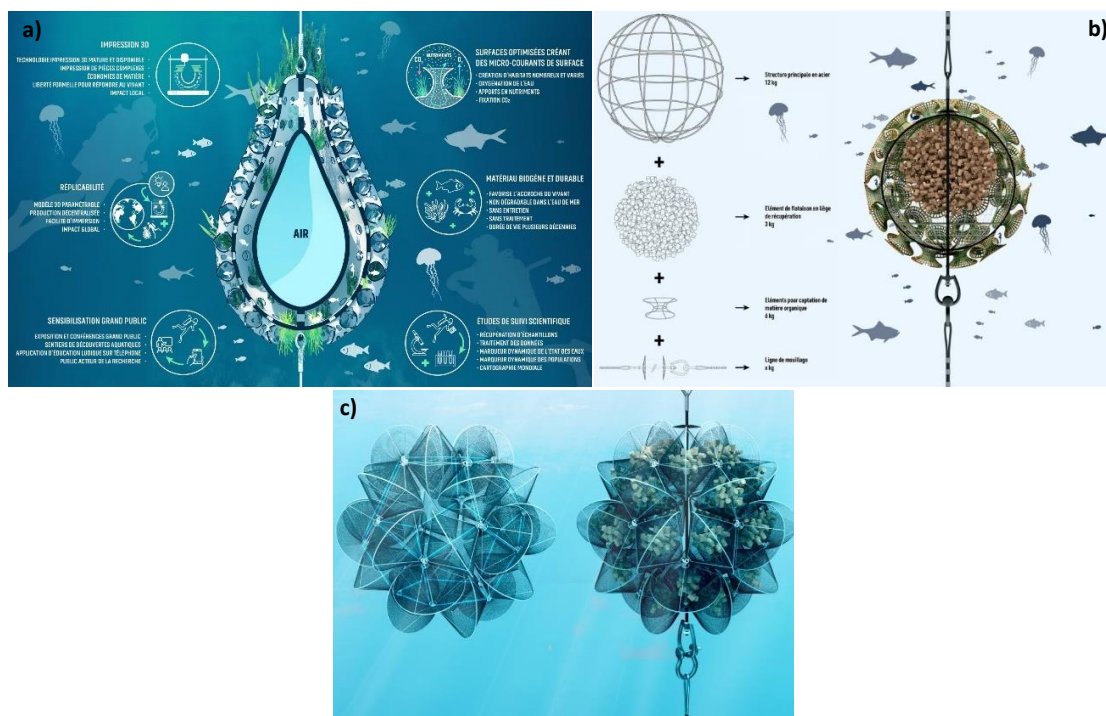


Figura 35. Fases concetuais do projeto *Floating Reef* (Pure Ocean, 2022). a) Primeiro modelo; b) Segundo modelo; c) Terceiro modelo.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Está atualmente em curso a validação do projeto para que se possam realizar os primeiros testes do projeto, entre eles implantação e monitorização. A instalação de modelos de teste em locais próprios ou concessões privadas no resto da costa está também a ser considerada, com o objetivo de maximizar a diversidade de ambientes físicos e biológicos em torno das boias experimentais.



Figura 36. Proposta concetual da fase 3 do projeto (Pure Ocean, 2022). a) Simulação de teste de monitorização das estruturas; b) Protótipo da estrutura.

Tabela 17. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto *Floating Reef*.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
x			x	x	

Ørsted /WWF (2022) – Dinamarca

O projeto da Ørsted em parceria com a WWF contou com a elaboração de 12 estruturas de recife artificial através de impressão 3D, onde está localizado o parque eólico *offshore* de Anholt, pertencente ao ecossistema do Grande Mar do Norte. O objetivo primordial do projeto foi de mitigar consequências oriundas de atividades como a sobrepesca e o declínio da oxigenação do ecossistema que resultaram numa decadência significativa da unidade populacional de bacalhau nos últimos 20 anos. Estima-se que esta situação está na fonte de um efeito negativo na cadeia alimentar do ecossistema, afetando a biodiversidade e a resistência do mesmo às alterações climáticas.



Figura 37. Processo de instalação dos recifes artificiais no Grande Mar do Norte (Ørsted & WWF, 2022).

As estruturas são compostas por várias camadas ligadas entre si por cavidades onde os peixes podem entrar e sair. Ao mesmo tempo, as próprias estruturas fornecem superfícies e fendas onde outros organismos se podem fixar. Os recifes têm cerca de um metro cúbico e variam em largura e peso para melhor imitarem os *habitats* naturais, podendo pesar até meia tonelada. Os recifes são constituídos por 70% de areia e 30% de cimento pozolânico feito de cinzas vulcânicas e PC. Estas estruturas são biocompatíveis devido à ausência de substâncias sintéticas ou tóxicas de origem industrial e ao pH moderadamente básico das mesmas estruturas. A expectativa é que os novos recifes impressos em 3D possam complementar os já existentes e sejam rapidamente habitados por vida.



Figura 38. Colonização de espécies na estrutura, maioritariamente micro-organismos (Ørsted & WWF, 2022).

Tabela 18. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto Ørsted /WWF.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X			X	X	

EMU (2023) - Austrália

O projeto EMU (*Erosion Mitigation Units*) foi desenvolvido pela *Reef Design Lab* e envolve a criação de estruturas modulares através da mistura de materiais sustentáveis, de forma a mitigar a erosão que se faz sentir nas zonas costeiras, e ao mesmo tempo criar *habitats* otimizados para espécies colonizadoras como mexilhões e ostras (Reef Design Lab, 2023).

Para isto, cada módulo foi fabricado a partir de cofragens reutilizáveis e moldado numa mistura de betão de baixo consumo energético com uma mistura de conchas recicladas. As formas orgânicas, que podem assemelhar-se a raízes de lótus, foram uma escolha de *design* intencional para reduzir o número de materiais necessários à criação das unidades e forjar abrigos onde os peixes e outras espécies marinhas possam encontrar condições de superfície ideais para o seu desenvolvimento.

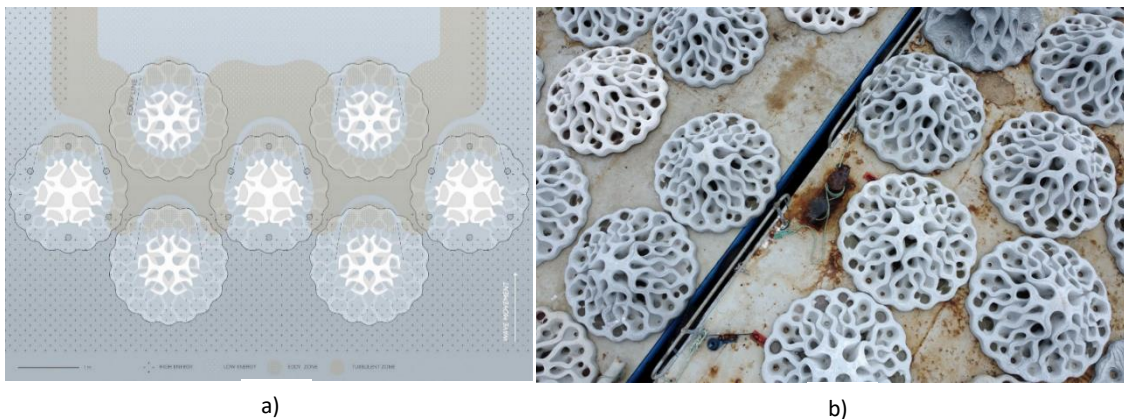


Figura 39. Conceitualização do projeto EMU (Reef Design Lab, 2023). a) Demonstração da possibilidade de disposição das estruturas; b) Protótipos prontos para deposição.

Cada unidade pesa cerca de 1600kg para poder suportar ondas fortes e é mecanicamente ancorada à areia de forma a evitar perdas de estabilidade. A conceção geométrica dos módulos permitiu recriar a inclinação acentuada das colinas rochosas na esperança de reduzir a força das ondas e evitar a erosão extrema.

Embora ainda seja um pouco cedo para dizer, o sucesso do projeto será medido pela forma como atrai colónias de peixes e moluscos para a área. As arraias já estão a abrigar-se debaixo das unidades e os grossos montes de ervas marinhas que crescem à sua volta apontam para a estabilização da estrutura (Goad Alex, 2023).

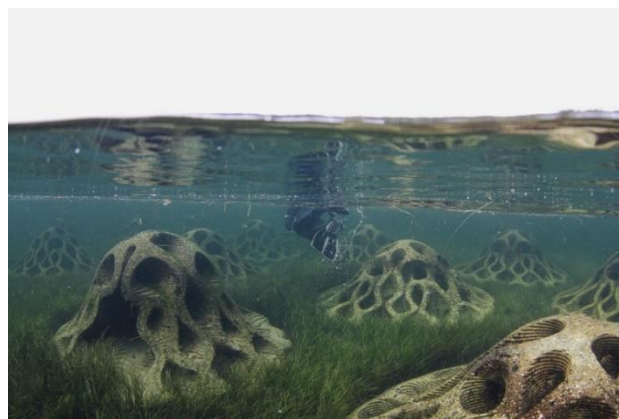


Figura 40. Monitorização das estruturas EMU (Goad Alex, 2023).

Tabela 19. Classificação das características na morfologia, configuração e textura do projeto EMU.

Morfologia		Configuração		Textura	
Natural	Geométrica	Modular	Independente	> captação	< captação
X		X			X

2.7 Materiais utilizados em Recifes Artificiais

Para além das considerações de que os recifes artificiais não devem criar riscos à navegação ou ao ambiente marinho, os materiais utilizados devem potenciar benéficamente as espécies envolvidas, para garantir o sucesso na implementação da estrutura.

Na revisão de literatura realizada dos principais projetos existentes até à atualidade, de recifes artificiais fabricados através da impressão 3D com resultados preliminares ou finais positivos, percebe-se que são utilizados maioritariamente materiais à base de argamassas de betão, misturas de areia de dolomite ou arenito, agregados cimentícios, carbonato de cálcio e filamentos poliméricos (Tabela 20).

Tabela 20. Tabela resumo das dimensões gerais e materiais utilizados nos projetos reunidos.

Projetos	Peso [Kg]/Dimensão [m]	Material
Reef Arabia – Barém	498/1 (altura)	Arenito
Living Seawall - Austrália	-----	Betão
Mars – Maldivas	-----	Cerâmica moldada, cimento, reforço aço
EMU - Austrália	2 (largura)	Cimento reforçado com fibra de vidro (com fibras poliméricas recicladas) Conchas
<i>The Octopus's Gardener</i> - Indonésia	3-10 (altura)	Agregados de coral
<i>3D Clay Printing</i> – China	0,6/painel (diâmetro)	Argila de terracota
<i>Floating Reef</i> – França	-----	Biopolímeros e materiais reciclados (cortiça)
<i>Buoyant Ecologies Float Lab</i> – EUA	4 x 2 (cxl)	Compósito polimérico reforçado com fibras
Orsted/WWF – Dinamarca	-----	Areia, cimento pozolânico
3D PARE - Portugal	1000/1 largura	Misturas de argamassas geopoliméricas e cimentícias e carbonato de cálcio

2.8 Análise/Reflexão

O estudo dos diversos projetos de desenvolvimento e implementação de corais artificiais um pouco por todo o mundo, permite tirar algumas conclusões relacionadas com as estruturas e os materiais, que se revelam importantes para o desenvolvimento do caso de estudo.

A maioria das estruturas apresentadas caracterizam-se como tendo uma geometria complexa e uma grande variedade de texturas e cavidades. Estas características são peças chave, uma vez que se mostram relevantes para as relações tróficas entre o coral e a biodiversidade, que são influenciadas positivamente pela sua presença. Adicionalmente, a presença de cavidades é ainda um fator diferenciador, dado que permitem diminuir o peso da estrutura, facilitando a sua implementação.

No que toca ao material, é possível perceber que a grande maioria dos projetos utiliza argamassas constituídas por aglutinantes variados, que ajudam a equilibrar o pH das misturas com o meio marinho. Um dos pontos chave para o alcance da argamassa ideal é ter sempre por base o tipo de impressão pretendida, de modo a desenvolver logo de início um material que seja compatível com a mesma.

Em forma de conclusão, destaca-se aqui o coral desenvolvido pelo Laboratório de Fabrico Robótico na China, impresso a partir de argila de terracota, que mostra o potencial da impressão 3D de baixa escala para alcançar geometrias orgânicas e de elevada complexidade. Como observado, foi o projeto que mais se aproximou dos sistemas vivos de corais, recriando as suas características essenciais, o que aumenta a probabilidade de sucesso na atração de espécies.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes



Coral Artificial, Gabriel Monteiro

CAPÍTULO 3. CASO ESTUDO

3.1 Contexto

A pesquisa bibliográfica previamente abordada sustenta a implementação de recifes de CA como solução de mitigação aos danos nos ecossistemas marinhos, nomeadamente provocados pela implementação de plataformas eólicas. Os projetos enumerados comprovam igualmente o sucesso na utilização de materiais biodegradáveis em estruturas deste tipo, mantendo-se níveis de interação tróficos igualmente interessantes e competitivos. Uma parte significativa dos projetos de implementação abordados foram instalados recentemente (2017-2023), podendo concluir-se que é uma área de investigação em processo de amadurecimento, de forma a validar a incursão de novas misturas de material com o objetivo de melhorar a atratividade marinha.

Neste contexto, surge o caso de estudo em questão, onde se pretende beneficiar da incursão das mais recentes plataformas eólicas flutuantes no mercado português, e idealizar uma proposta de instalação de um coral artificial complementar à plataforma. Considerando todas as nuances abordadas na revisão bibliográfica, pretende-se explorar o processo de manufatura aditiva, nomeadamente de impressão 3D, na obtenção de formas e texturas consensuais da temática.

Numa primeira fase, será enfatizado o processo da procura da forma, onde haverá a preocupação em definir elementos construtivos não invasivos a nível ambiental, e concordantes com as interações fisiológicas de que será alvo. Serão exploradas diversas temáticas do *design*, na tentativa de compreender a sua importância como ferramenta para obter soluções ecologicamente sustentáveis. Serão sobretudo exploradas metodologias centradas na natureza, e na sua relação com o homem e o produto, como base principal do desenvolvimento.

Numa fase posterior, proceder-se-á ao processo experimental, que seguirá os requisitos previamente definidos no plano. Nesta fase, será importante caracterizar a mistura obtida para impressão e entender quais os materiais que oferecem as melhores características de acordo com o conceito adotado. Testar-se-ão dois métodos distintos de avaliação de amostras, sendo eles a extrusão manual e a extrusão por via de impressora 3D, respetivamente.

Por fim, proceder-se-á à impressão do protótipo, onde se avaliará a impressão da mistura selecionada em maior escala e estudar-se-á a viabilidade do conceito desenvolvido. Além disso, será oferecida escalabilidade à solução de forma a estudar uma possível interação com um protótipo da plataforma.

3.2 Estudo de caso: Projeto WindFloat

Foi conduzido um caso de estudo teórico sobre o projeto *WindFloat*, situado no norte do país em ZEE portuguesa, com a finalidade de recolher contributos válidos para a identificação da problemática a tratar nesta dissertação. Este estudo englobou uma recolha de dados estatísticos relativos às vantagens económicas e competitivas do projeto, bem como aos impactos ambientais registados. A escolha do campo de investigação recaiu sobre o projeto *WindFloat*, situado ao largo da costa de Viana do Castelo, por estarem reunidas as condições necessárias para o desenvolvimento deste estudo, tais como, o conhecimento prévio do contexto português na implementação da transição energética,

Olhando para Portugal como objeto de estudo, será importante contextualizar o seu mercado, bem como a evolução do mesmo para as tecnologias de geração de energia consideradas e discutidas previamente. Portugal, em concordância com o que acontece nos mercados europeus de energia, denota, na última década, uma transição moderada, mas progressivamente mais intensa para tecnologias de geração de energia *offshore*. As restrições geográficas, os padrões de vento e as limitações ambientais de Portugal dificultam a utilização de recursos de energia eólica em terra, potencializando naturalmente a exploração da tecnologia em mar, apesar de barreiras como custos elevados associados, considerações ecológicas e requisitos laborais (Vieira et al., 2019). Para esta transição, Portugal dispõe de características atrativas para a evolução deste mercado, disponibilizando de uma larga zona marítima (cerca de 400km²) com um largo espectro de profundidade entre os 30-90m (Castro-Santos et al., 2020). Existe, portanto, uma motivação para o aproveitamento destas características e para o aparecer de projetos inovadores.

O projeto *WindFloat* alinha-se com esta transição energética e surge precisamente para superar desafios como o desaproveitamento de condições ótimas em alto mar. O *WindFloat* utiliza uma plataforma flutuante semi-submersível, ancorada ao fundo do mar por cabos, evitando uma fixação rígida ao fundo oceânico. Essa plataforma permite que as turbinas eólicas sejam instaladas em áreas com profundidades além de 40 metros – uma limitação das soluções tradicionais. O design flutuante oferece estabilidade às turbinas, mesmo sob condições de mar agitado, e permite que as estruturas sejam montadas em terra e depois rebocadas até o local de operação, reduzindo custos e riscos durante a fase de construção.

O protótipo do *WindFloat* foi instalado em 2011 ao largo da costa de Aguçadoura, Portugal, equipado com uma turbina de 2 MW. Durante os testes, a plataforma conseguiu resistir a ondas de até 17 metros de altura e ventos muito intensos, comprovando a sua robustez. Esse sucesso levou ao desenvolvimento da *WindFloat Atlantic*, um parque eólico flutuante de escala comercial, com três plataformas flutuantes e turbinas com capacidade total de 25 MW, suficiente para abastecer cerca de 60 mil lares portugueses (Figura 41).



Figura 41. Projeto *WindFloat* em Viana do castelo, Portugal (WindFloat®, 2024).

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes



Figura 42. Linha temporal do projeto *WindFloat* (WindFloat®, 2024).

3.2.1 Zona de Implementação

De acordo com a figura 43, é possível depreender a localização das três turbinas do projeto *WindFloat Atlantic*, que se encontram atualmente em fase de operação – Viana do Castelo. Pouco abaixo é ainda indicado a localização do protótipo que antecedeu e validou a execução do primeiro parque eólico flutuante em Portugal (*WindFloat 1*) – Aguçadoura. Ambos foram localizados a cerca de 20km da costa, onde se atingem profundidades de cerca de 100m.

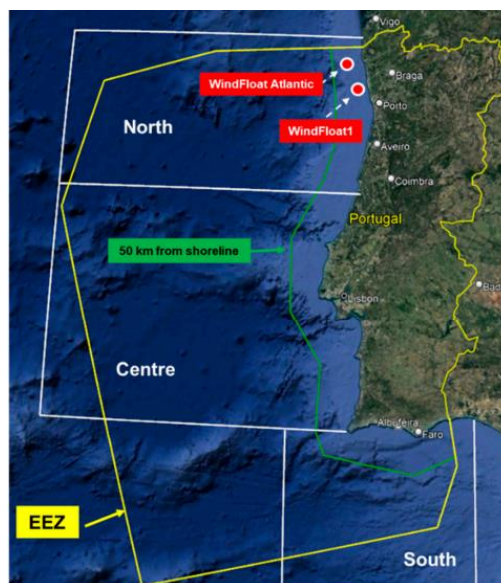


Figura 43. Localização geográfica do projeto dentro da ZEE portuguesa (Onea & Rusu, 2022).

3.2.2 Dimensionamento

Uma análise à estrutura e dimensionamento da plataforma e da turbina permite retirar ilações de escala do projeto. A plataforma apresenta uma estrutura triangular interligada por vigas com um diâmetro específico de 10,7m, distanciando-se 56,4m entre si. Esta configuração foi pensada para oferecer uma distribuição equilibrada de peso e resistência, proporcionando maior estabilidade em condições adversas. A turbina, por sua vez, alcança alturas de cerca de 200m e situa-se presa a uma das colunas da plataforma. Essa coluna, chamada de coluna principal, é reforçada para suportar o peso da turbina e as forças geradas pelo vento. Ao colocá-la em uma extremidade da estrutura triangular, o centro de gravidade da plataforma é deslocado de maneira que as outras duas colunas, submersas e cheias de lastro, contrabalançam o peso e equilibram a estrutura. Esse design minimiza os movimentos de rotação e oscilação causados pelo vento e pelas ondas, permitindo que a turbina opere com eficiência em condições variáveis (Y. Jiang et al., 2020).

Tabela 21. Parâmetros principais da plataforma do tipo *WindFloat* (Y. Jiang et al., 2020).

Parâmetro	Dimensão
1- Altura da Coluna (m)	33.6
2- Diâmetro da Coluna (m)	10.7
3- Coluna do centro ao centro (m)	56.4
4- Diâmetro do pontão (m)	2.2
5- Altura do CG (m)	29.8

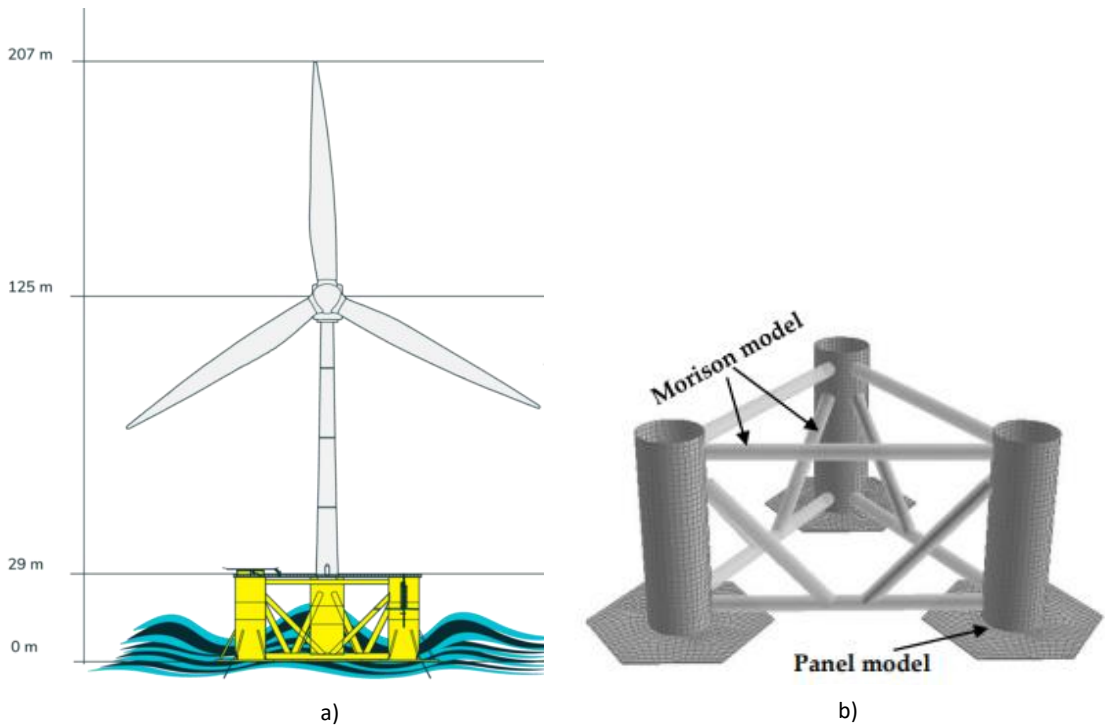


Figura 44. Estrutura WindFloat. a) Dimensionamento principal da estrutura; b) Estrutura triangular semi-submersível (Y. Jiang et al., 2020; WindFloat®, 2024).

3.2.3 Síntese conclusiva

Com base na informação recolhida, conclui-se que o projeto *WindFloat* tem uma elevada importância económica e energética, representando uma solução importante para a diminuição do consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis. É de realçar que em apenas 11 anos, este projeto conseguiu duas instalações de sucesso, o que é considerada uma transição energética rápida.

No entanto, apesar deste sucesso, há uma notória falta de dados estatísticos no que toca aos impactos ambientais possivelmente provocados pelas instalações energéticas. Não obstante, é possível assumir que esses impactos existem, como já estudado na revisão de literatura. Ora, pela análise da estrutura e dimensão, percebe-se que tanto as plataformas como as turbinas apresentam uma elevada robustez, que naturalmente, presume-se, trará perturbações para o ecossistema onde estão inseridas. Estas perturbações criam desafios à sobrevivência de determinadas espécies marinhas, podendo culminar em alterações drásticas nas relações tróficas do ecossistema.

Desta forma, identifica-se um problema e abre-se uma oportunidade para a procura de uma solução que mitigue os impactos do projeto no ecossistema onde se insere.

3.3 Design como ferramenta para a preservação da biodiversidade

Existem diversas formas de perceber o *design*, havendo uma ligação intrínseca ao nosso envolvimento com a experiência, social ou cultural, de viver. McDonough (2002) descreve o *design* como o primeiro sinal da intenção humana. A intenção que comanda a evolução, o experimentar o erro e, inevitavelmente, voltar a tentar. A mais recente abordagem ao *design* conecta-o a um modelo de preservação, redefinindo experiências culturais no contexto contemporâneo. É visto, portanto, como uma ferramenta para transformar e revitalizar práticas culturais, de forma a mudar e alterar percepções, gerar e disseminar conhecimento e criar valor através da experiência (Chandran, 2021).

A evolução da matéria do *design* tem sido liderada pelo surgimento do campo do desenvolvimento e *design* regenerativos, que têm emergido da corrente ecológica para redefinir a definição de sustentabilidade. Estima-se que esta abordagem esteja enquadrada com as atuais estratégias de *design* eco eficientes de forma a inverter a degeneração dos sistemas naturais (Figura 45) do planeta e dos sistemas humanos que os habitam (Mang & Reed, 2012).

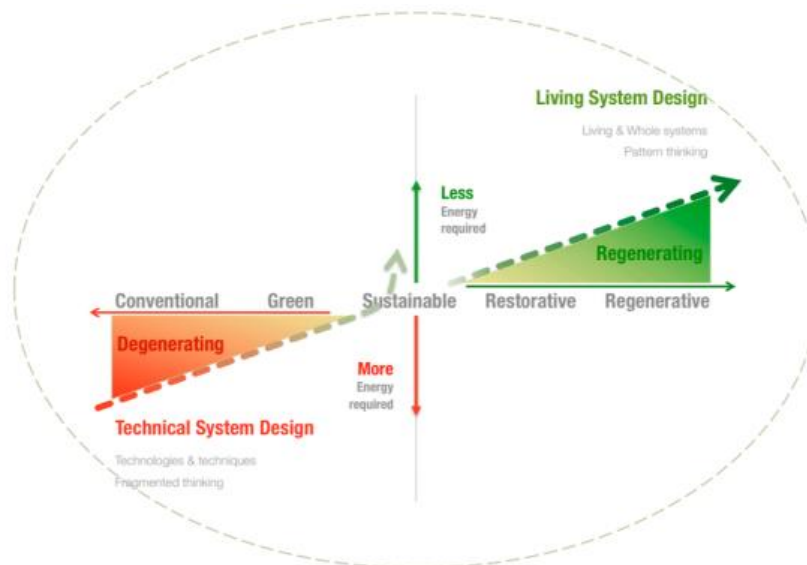


Figura 45. Contraste entre o design técnico convencional e o design apoiado por premissas ecológicas e sustentáveis (Mang & Reed, 2012).

Durante as décadas de 1980 e 1990, foram desenvolvidas várias estratégias ecológicas para a sustentabilidade, alinhadas em torno de um compromisso com objetivos positivos para o ambiente construído e para a integração das estruturas, processos e infraestruturas com os sistemas vivos naturais para esse fim.

Biomimética - A biomimética é uma abordagem de design que se inspira nos sistemas, processos e formas da natureza (Pedersen Zari & Hecht, 2020), com a premissa de resolver os desafios contemporâneos de forma mais sustentável, assumindo um alinhamento com os processos ecológicos da natureza. Os princípios que orientam este pensamento biomimético derivam essencialmente de uma ecologia do funcionamento da vida e fornecem um ponto de partida concetual para avançar para um âmbito mais completo e regenerativo dos sistemas.

Design Regenerativo – Uma abordagem ao *design* regenerativo reconhece nele maior importância quando comparado com a matéria da biomimética, apesar de ambas partilharem premissas fundamentalmente semelhantes (Blanco et al., 2021). Apesar disso, o *design* regenerativo reconhece, para além de uma relação entre o produto e a natureza, uma relação ainda mais impactante entre os seres humanos e a natureza. Assim sendo, é uma abordagem co evolutiva na medida em que a natureza e o homem se encontram numa relação mutuamente benéfica, plena de que a saúde de um ecossistema depende da saúde humana e a saúde humana depende da saúde de toda a ecologia (Mang & Reed, 2012).

Em conjunto, o desenvolvimento regenerativo e o *design* fornecem um quadro para criar, aplicar, adaptar e integrar uma mistura de tecnologias modernas e antigas na conceção, gestão e evolução contínua de gestão e evolução contínua de ambientes construídos sustentáveis, alcançando resultados ecológicos e sociais positivos que incluem:

- Melhorar a saúde e a vitalidade das comunidades humanas e naturais - físicas, psicológicas, económicas e ecológicas;
- Produzir e reinvestir recursos e energia excedentes para desenvolver a capacidade das relações subjacentes e sistemas de apoio de um local necessários para a resiliência e evolução contínua dessas comunidades;
- Criar um campo de cuidados, empenhamento e ligação profunda ao lugar que permita as mudanças necessárias para que o mesmo perdure e evolua ao longo do tempo.

Tendo em conta esta informação, existirá um alinhamento do desenvolvimento do produto com as premissas aqui expostas, onde se utilizará o *design* como ferramenta para não só conceber um produto que se adapte eximamente ao ecossistema marinho, como também para regenerar os ecossistemas que são atualmente impactados com a implementação aerogeradores *offshore*.

3.4 Metodologia Experimental

A metodologia aplicada neste caso de estudo deriva sobretudo da pesquisa de mercado que foi elaborada na revisão bibliográfica, onde ficou clara uma progressiva utilização de materiais alternativos na última década para a obtenção de soluções mais sustentáveis de RC artificiais.

Nessa mesma linha de pensamento, a metodologia do presente caso de estudo foi desenvolvida com base em resultados obtidos pela comunidade científica, utilizando esses mesmos resultados para o desenvolvimento de um novo campo de investigação. Para isso, recorreu-se a um estudo empírico onde se testaram composições de concha de mexilhão, cimento e outros agregados (metacaulino, pó de tijolo e areia) para processos de moldagem em silicone de substratos de coral. Certas composições testadas deram bons indicativos quando em contacto com a água, porém o processo de moldagem revelou alguma ineficácia enquanto processo construtivo.

A motivação do novo campo investigacional passou, portanto, por demonstrar a eficácia das composições delineadas (Valenzuela Matus et al., 2024), otimizando-as e adequando-as ao processo construtivo de impressão 3D. Com isto em mente, delineou-se uma metodologia experimental para responder aos seguintes objetivos:

- I. Determinar os tipos de agregados mais adequados para impressão 3D;
- II. Avaliar os efeitos das diferentes composições na trabalhabilidade e impressão das misturas.

De acordo com os objetivos delineados, foi desenvolvido o seguinte organograma de forma a clarificar todas as etapas definidas para o projeto. Este, como apresentado na figura 46, descreve as fases de cada procedimento até à obtenção dos resultados e da idealização do conceito do recife artificial.

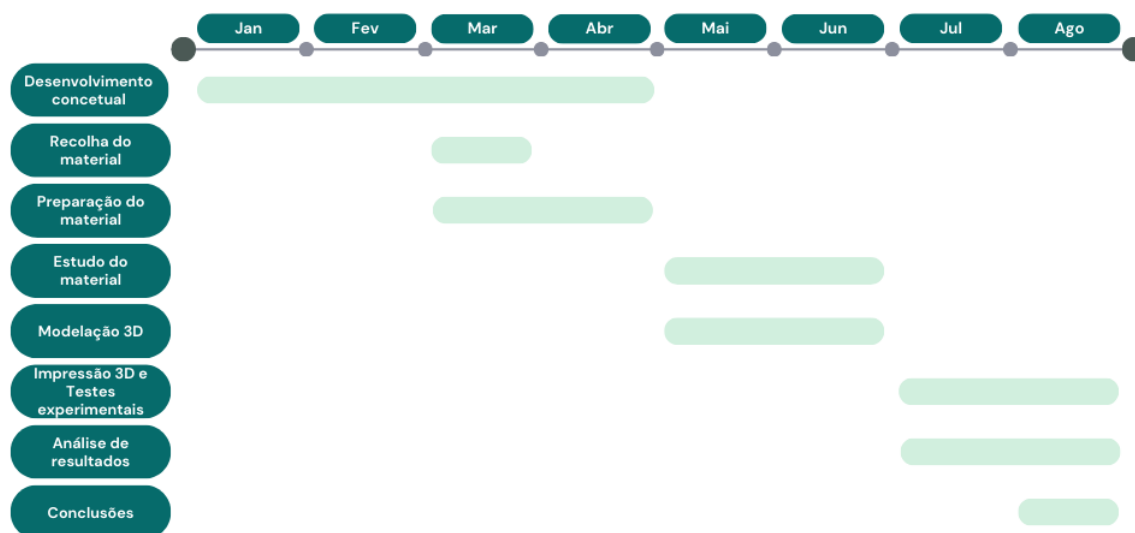


Figura 46. Organograma das etapas experimentais do caso de estudo.

3.5 Inspirações Conceituais

No que diz respeito à estrutura tridimensional, os recifes artificiais são principalmente concebidos de forma empírica, quantificando-se o número de espaços, vazios e fendas para avaliar a preferência dos peixes em diferentes tipos de abrigo. McCoy e Bell (1991) definiram a estrutura do *habitat* em três parâmetros diferentes, nomeadamente escala, complexidade e heterogeneidade, que estão intimamente relacionados com a forma e com a abundância das estruturas, diversidade e disposição dos elementos estruturais que compõem o *habitat* (Riera et al., n.d.).

Alguns estudos tentaram utilizar a rugosidade da superfície (Ferreira et al., 2001) ou a dimensão fractal (Caddy & Stamatopoulos, 1990)- formas complexas e padrões que exibem similaridade em diferentes escalas- como indicadores da complexidade estrutural dos recifes artificiais. No entanto, não existe um método normalizado para avaliar a estrutura dos recifes artificiais antes da imersão.

De maneira análoga, a biomimética, enquanto disciplina do *design*, surge como inspiração na procura de formas que potencializem a vida útil do coral, através da compreensão e replicação dos sistemas naturais biológicos já existentes. (M. Soares, 2008) pressupõe que a autossustentabilidade de um sistema biológico possa fornecer características passíveis de serem reproduzidas, exponenciando resultados de *design* mais sustentáveis. Deste modo, a natureza surge como fonte infinita de inspiração naquilo que será a recolha de traços orgânicos característicos, caracterizados pela sua complexidade, sensibilidade e flexibilidade.

Tendo isto em conta, foi realizado um levantamento de alguns projetos emergentes que se inspiram na natureza marinha, ilustrados na figura 47, simulando sistemas vivos a nível de formas, textura e elevação, recriando condições fisiológicas equilibradas e sustentáveis.

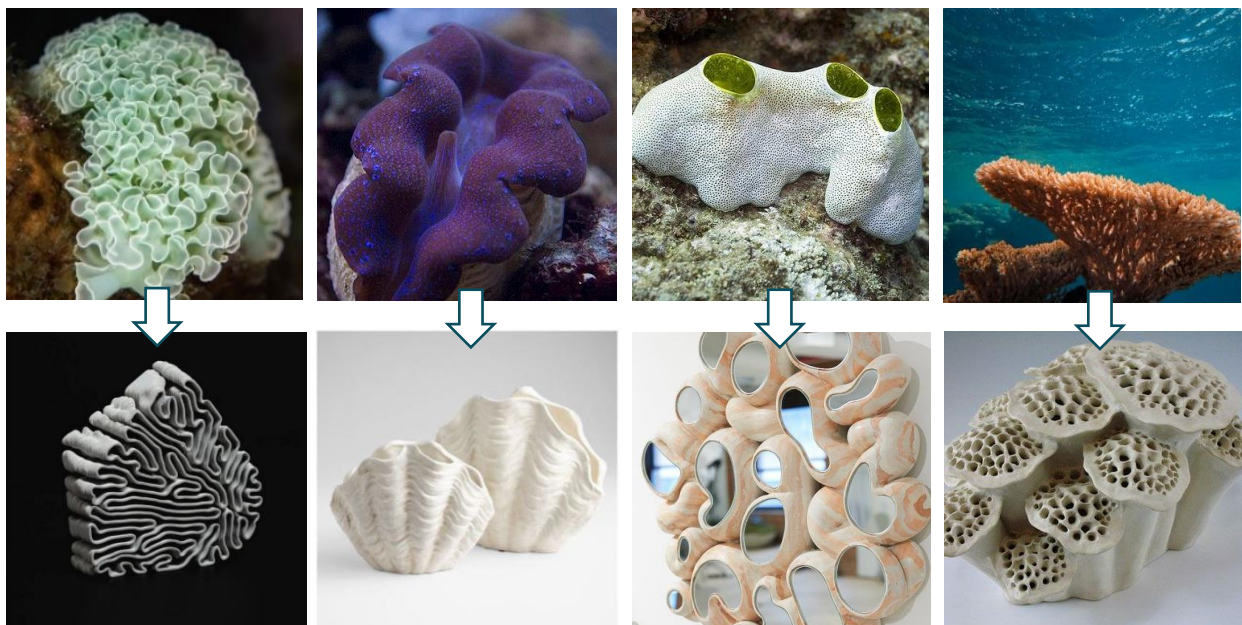


Figura 47. Projetos de *design* emergentes na recriação de sistemas vivos sustentáveis.

Com isto, foram identificadas três características únicas (Figura 48) na generalidade das espécies de corais. De forma combinada, ou até mesmo individual, estas características contribuem para o bom funcionamento destes sistemas no meio marinho, seja na sustentabilidade do ser vivo, como nas relações tróficas que desenvolve com a restante biodiversidade.

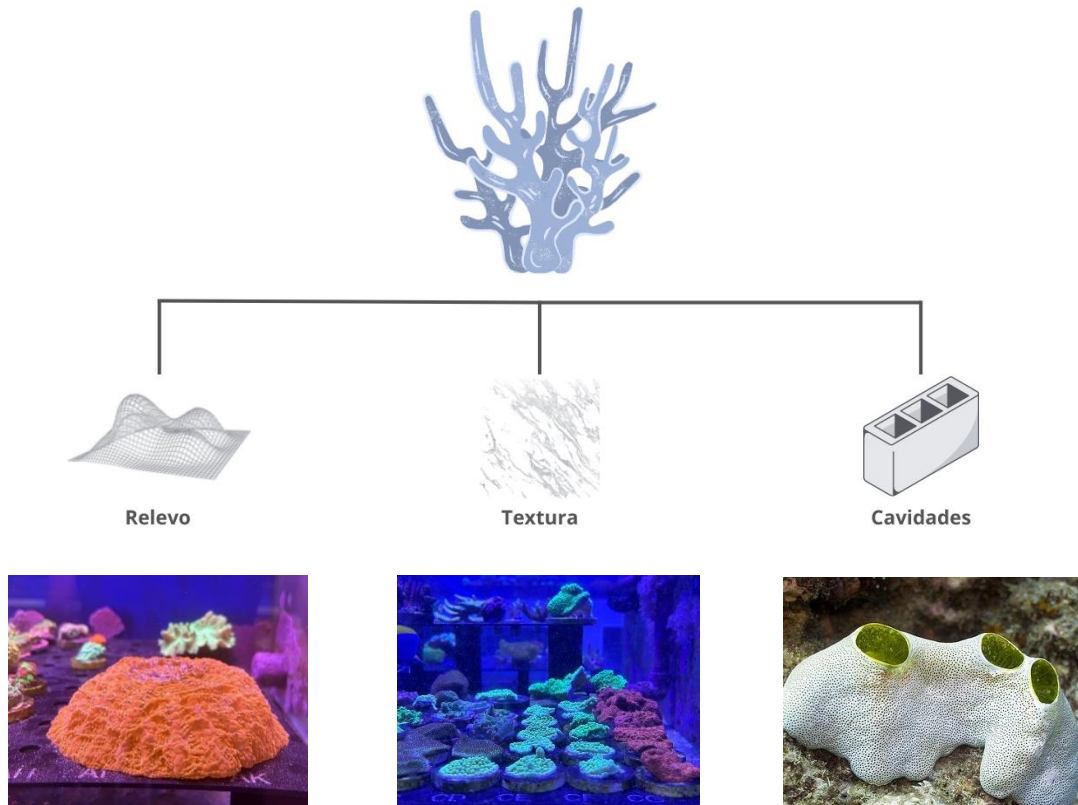


Figura 48. Principais características observadas do comportamento dos corais como fonte de inspiração.

Em primeiro lugar, o relevo surge como característica naturalmente imprescindível nestes sistemas, contribuindo para uma maior escalabilidade do ser vivo e para um alargamento das suas relações tróficas. Assim sendo, corais com diferentes tipos de relevo têm maior probabilidade de adquirir um maior número de relações tróficas, i.e., relação com uma maior quantidade de biodiversidade.

Da mesma forma, a textura é igualmente vital para uma maior atratividade de espécies para o sistema, partindo do pressuposto de que uma maior complexidade estrutural implica maior

Finalmente, diversos estudos analisados no trabalho de Z. Jiang sugerem que a existência de cavidades de diferentes geometrias num sistema de coral artificial contribui para o surgimento de um campo de fluxo da água multivariado que afetará positivamente a fixação da biomassa e a agregação dos peixes à estrutura. As geometrias das cavidades são geralmente circulares, quadradas ou poligonais, podendo também assumir formas irregulares (Z. Jiang, Liang, & Zhu, 2020).

3.6 Desenvolvimento do conceito

O conceito do projeto será alicerçado em três pilares, que explicarão e sustentarão o processo criativo do desenvolvimento do produto: Inspiração formal; inspiração imersiva; inspiração real. A criação de um coral artificial que se inspire nas formas orgânicas da concha e no *design* imersivo dos *brain corals* reflete uma abordagem moderna de biomimética onde se procura não apenas recriar sistemas naturais pré-existentis, como também integrá-los de maneira inovadora e funcional ao ambiente marinho.

Inspiração Formal: A Concha

Refletindo acerca dos traços geométricos deste elemento, existe uma disposição muito orgânica das suas linhas, resultando em formas fluídas, curvas suaves e simetrias harmonizadas. A concha, enquanto protege os organismos que nela habitam, simboliza uma estrutura de resistência e leveza, integrando-se perfeitamente no ambiente marinho.

No processo criativo existe, portanto, uma exploração muito evidente deste simbolismo na recriação de um sistema composto por dois módulos interligados, metaforizando ambas as partes da concha. Esta simbiose permitiu uma exploração de formas e texturas diferentes de forma a atrair uma maior quantidade de espécies para a estrutura.

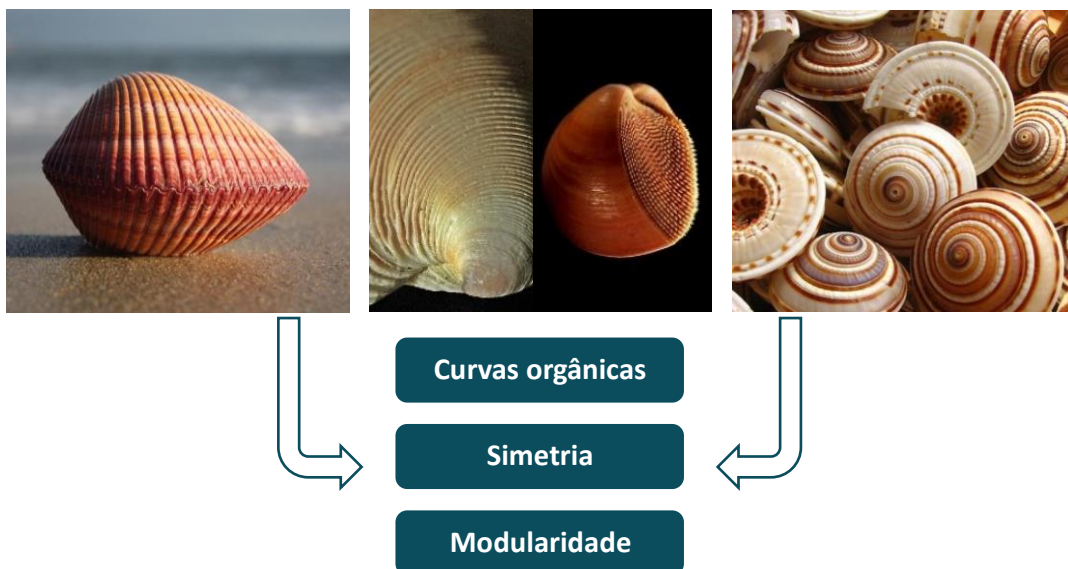


Figura 49. Parâmetros identificados na concha como inspiração para o processo criativo.

Inspiração Imersiva: *Brain Coral*

Os *brain coral* são uma espécie de coral específica, nomeadamente a *Diploria labyrinthiformis* (Figura 50), encontrada a profundidades médias entre 1-50m, e pertencente à família dos corais duros*. Estas formas complexas não são apenas visualmente atraentes, mas também desempenham um papel crucial na ecologia dos recifes. A estrutura labiríntica oferece abrigo para uma grande variedade de vida marinha, enquanto a grande área de superfície aumenta a capacidade do coral de sustentar comunidades de organismos simbióticos, como algas e invertebrados. Esta componente do desenvolvimento concetual teve como objetivo a recriação de um sistema de coral, simulando características naturalmente validadas.

No processo criativo existe a exploração desta componente, atribuída à parte superior do coral. O objetivo passa por recriar o caminho labiríntico, mas com a particularidade da atribuição de volume variável ao mesmo. Desta forma, promove-se a circulação de água, nutrientes e organismos marinhos, mas ao mesmo tempo a passagem de espécies de maior dimensão (peixes).

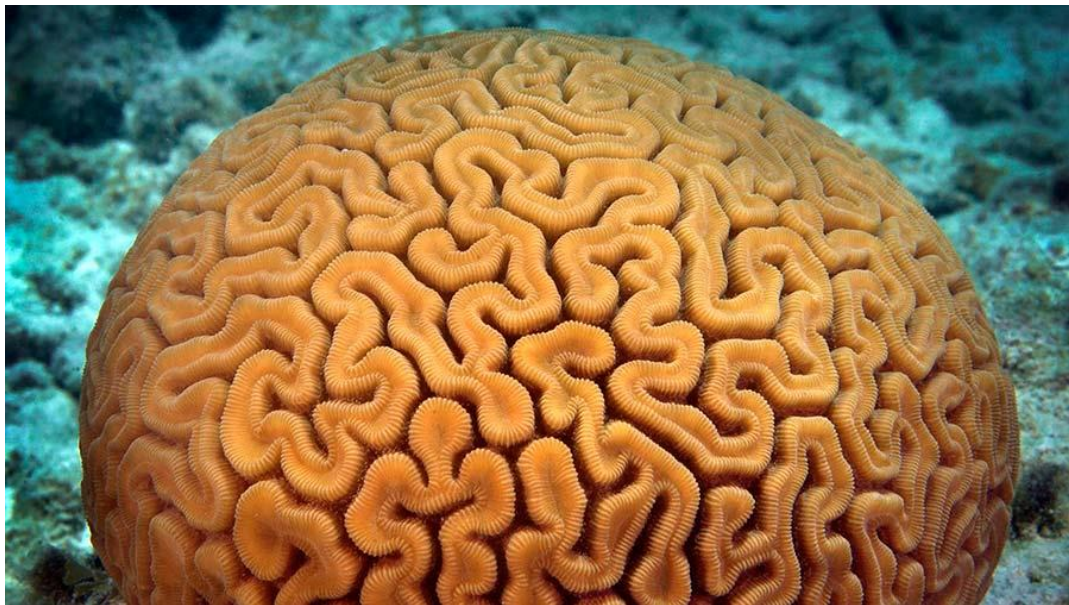


Figura 50. Exemplo de um *Brain Coral*, como fonte de inspiração imersiva na elaboração de caminhos labirínticos.

*corais duros - corais responsáveis principalmente pela formação de recifes por meio da produção e secreção de carbonato de cálcio.

Inspiração Real: Rede de pesca

A utilização da rede de pesca neste projeto não é apenas uma forma de sustentar o coral na plataforma flutuante, mas surge também numa vertente sustentável do mesmo. Estima-se que cerca de 2% de todas as artes de pesca se perdem anualmente no oceano (Richardson et al., 2022), representando cerca de 10% de todo o plástico existente no ecossistema marinho (Australian Marine Conservation Society, n.d.). Segundo especialistas, é estimado que este desperdício ameace cerca de 65% dos animais marinhos, promovendo alterações sistémicas nos ecossistemas como por exemplo a transferência de espécies invasoras, danos nos *habitats*, acumulação de microplásticos, entre outros (UN, 2023).



Figura 51. Influência do desperdício de plástico derivado de rede nos oceanos como inspiração para o método construtivo do coral (heal the planet, n.d.).

Processo Criativo

De acordo com a exploração das diversas vertentes de inspiração, dividiu-se o processo criativo em quatro fases:

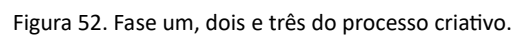
- Fase 1: Exploração formal;
- Fase 2: Definição de forma;
- Fase 3: Simbiose entre módulos;
- Fase 4: Implementação.

A fase 1 teve como principal objetivo a exploração de organicidade em sistemas vivos já existentes que pudessem servir de base para uma transposição de características para o coral artificial, sustentada na disciplina da biomimética. Tendo isso em mente, foi efetuado um estudo formal e simbólico da concha onde, numa primeira fase, se exploraram curvas orgânicas características destes organismos, bem como o seu modo de ligação natural. Nesta fase foi, portanto, possível atribuir importância a características como simetria, organicidade e modularidade (Figura 52).

A fase 2, sustentada na premissa da biomimética enquanto disciplina central do exercício, permitiu a atribuição de forma ao produto. Esta definição passou pela alusão ao sistema de oclusão da concha, revertendo-o por outro lado num sistema de 2 módulos abertos ao exterior e com funcionalidades contemplares. Esses módulos, à sua medida, usufruem dos traços orgânicos das curvas da concha e permitem oferecer volume à peça (Figura 52).

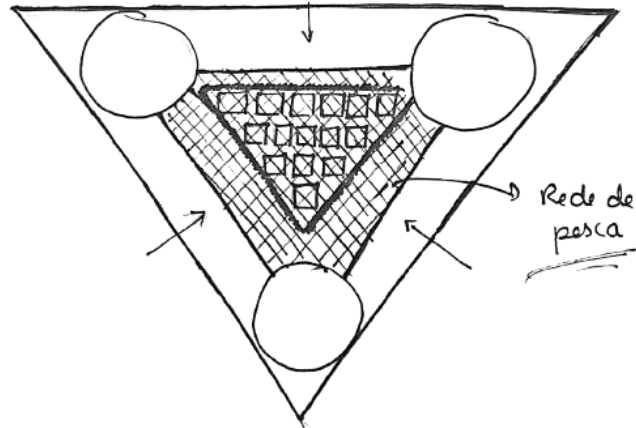
Ambas as fases foram cruciais para o recriar de dois módulos que se pudessem complementar em termos não só estéticos, como também funcionais. Tendo isso em conta, foi atribuído ao módulo 1 uma aleatoriedade e assimetria mais característica, com uma função de atrair espécies de maior dimensão. Por outro lado, o módulo 2 foi pensado para oferecer volume à peça e, ao mesmo tempo, oferecer uma base de sustentação para a afixação de micro-organismos (plâncton). No modo de implementação, a ideia passa por suportar os módulos com rede de pesca porventura reutilizada, e colocá-los entre os cilindros da plataforma (Figura 53).

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

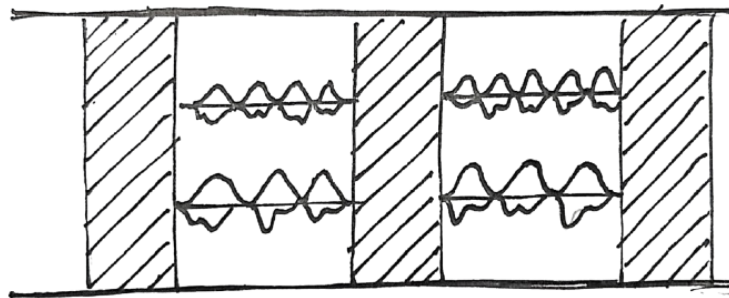


Fase 4

Vista de Topo



Vista Lateral



Vista Isométrica

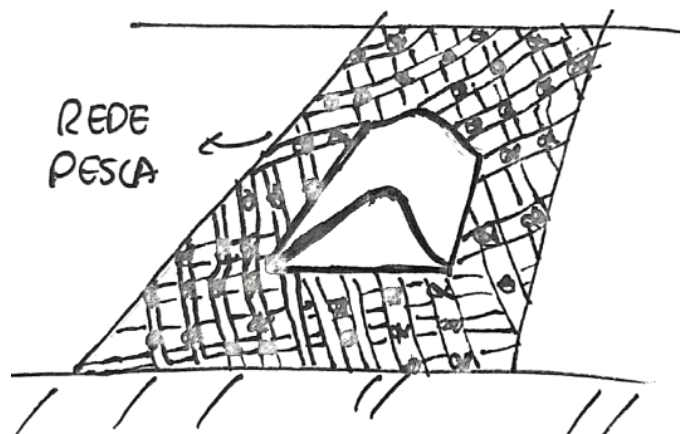


Figura 53. Fase quatro do processo criativo.

3.7 Criação do modelo tridimensional

O desenvolvimento do modelo tridimensional foi realizado em duas fases, recorrendo à utilização de dois *softwares* paramétricos distintos para cada fase do processo.

Em primeiro lugar, recorreu-se ao *software Solidworks* para a criação das superfícies relativas às três camadas do sistema. Após esta fase, utilizou-se o *software MeshMixer* para a incorporação das texturas nas superfícies do coral.

3.7.1 *Design* para impressão 3D

A impressão 3D oferece elevada versatilidade naquilo que é a sua capacidade em conceber produtos de extrema complexidade geométrica e *designs* customizados. No entanto, existem algumas nuances que devem ser respeitadas no momento do processo criativo para que se possam acomodar as restrições e capacidades das impressoras 3D. Destacam-se algumas que foram consideradas durante a criação do modelo tridimensional (Lee & Bhat, 2024):

- Suporte e orientação;
- Espessura de parede e enchimento;
- Precisão dimensional.

Em primeiro lugar, a orientação e o suporte no desenho CAD são fundamentais para a qualidade e sucesso da impressão. A orientação do modelo na mesa de impressão influencia a resistência, precisão e aparência do objeto, enquanto o suporte evita deformações e colapsos durante a impressão. É essencial selecionar uma orientação e um suporte que otimizem o tempo de impressão, reduzam o consumo de material e minimizem o esforço de pós-processamento, garantindo ao mesmo tempo a integridade estrutural e a estética da peça.

A espessura da parede e o enchimento do seu desenho CAD são fatores essenciais para a durabilidade e funcionalidade da peça. A espessura da parede refere-se à distância mínima entre as superfícies interior e exterior do seu desenho e afeta a resistência, o peso e o custo. O enchimento refere-se à percentagem de material que preenche o interior do seu desenho e afeta a rigidez, a flexibilidade e a estabilidade da peça.

Por fim, a precisão dimensional é igualmente de extrema importância durante o desenho CAD. Em primeiro lugar, existe uma preocupação de escala e, portanto, de adequar o *design* às dimensões máximas da impressora que se utilizará (Diâmetro Base: 40cm). Além disso, é também essencial que haja um ajustamento do desenho a uma possível ocorrência de erros no momento de impressão, que possam comprometer a mesma.

3.7.2 Processo construtivo

A figura 54 demonstra a sequência do processo construtivo tridimensional do sistema de coral, constituído por duas peças. Pelo que se pode observar, e de acordo com o tópico 3.7.1, houve uma procura por um *design* otimizado para a extrusão na impressora *Wasp 40100*. O modelo tridimensional na imagem representa as superfícies referentes ao centro do caminho de impressão (Figura 53 b)), uma vez que estas obterão a espessura relativa ao diâmetro do bocal utilizado na impressora (12mm). Este processo facilita a criação do ficheiro G.Code no *software Grasshopper*, um programa mais adequado para processos de impressão em grande escala.

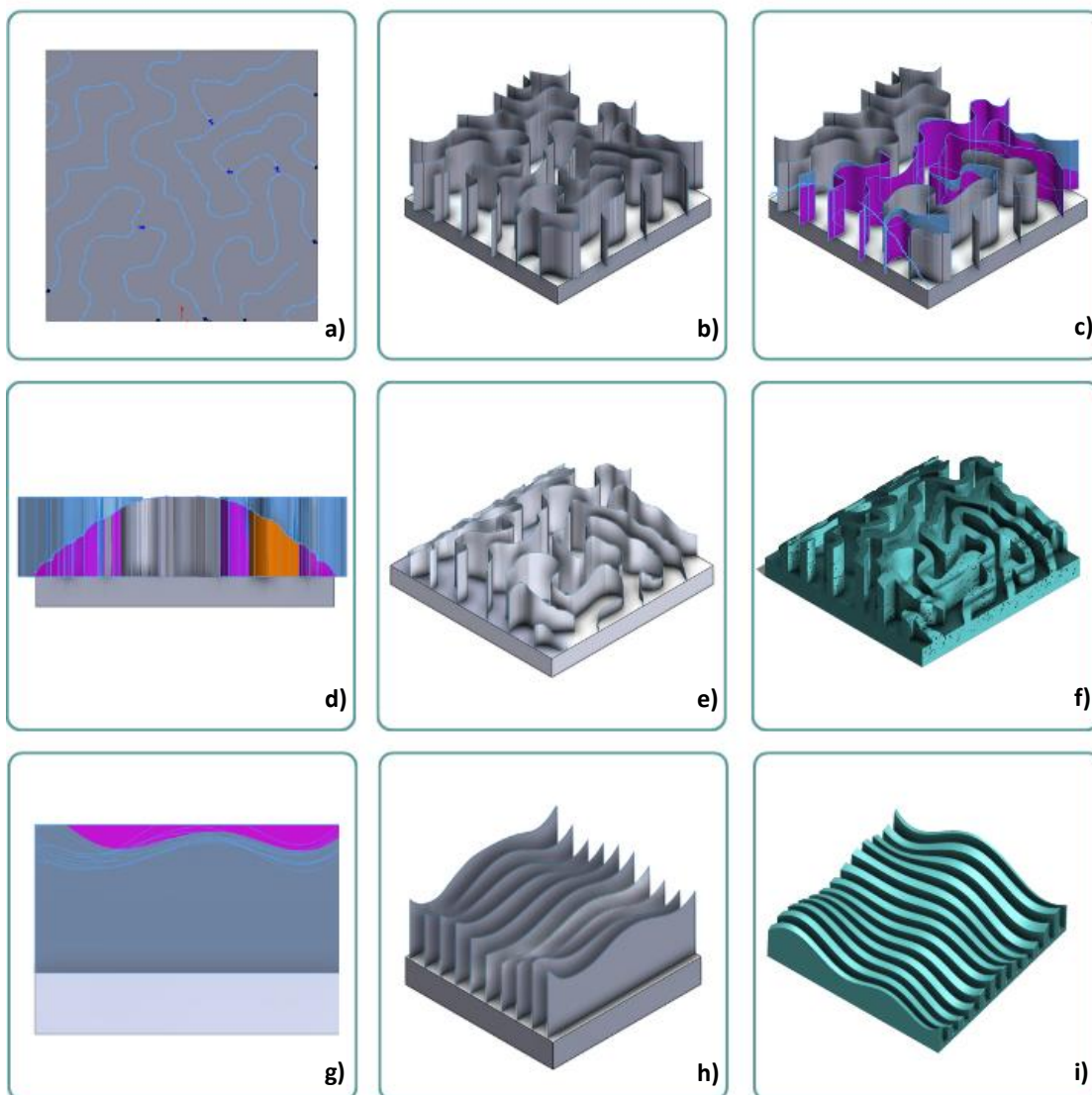


Figura 54. Processo construtivo para a criação do protótipo de CA utilizando o *software Solidworks*. a) Criação de labirinto em *sketch* utilizando o comando *Spline*; b) Projeção vertical do *sketch* utilizando o comando *Surface-Extrude*; c) Utilização do comando *Surface-Trim* para oferecer a topologia desejada à parte superior; d) Vista frontal da utilização do comando *Surface-Trim* que corta as superfícies através de uma linha definida; e) Modelo para impressão 3D; f) Aplicação do comando *Thicken* de modo a oferecer espessura às superfícies criadas anteriormente; g) Aplicação do mesmo comando *Surface-Trim* à parte inferior; h) Modelo para impressão 3D; i) Aplicação do comando *Thicken* de modo a oferecer espessura às superfícies criadas.

3.7.3 Sistema de fixação do coral

Após o processo construtivo do coral terminado, é importante compreender o modo de fixação entre as duas partes existentes, bem como o modo de fixação do sistema coral-rede à plataforma.

Sistema Coral-Rede

Entre as diversas possibilidades existentes de fixação do coral à rede, optou-se pela incursão de um sistema não invasivo, i.e., que não provoque alterações ao ecossistema. Decidiu-se, portanto, que se conectariam as duas partes do coral através de um adesivo para betão, minimizando efeitos e impactos de sistemas de fixação mais invasivos (Figura 55). Sugere-se a utilização do adesivo Sikadur®-32+ da Sika Portugal.



Figura 55. Sugestão da utilização do adesivo para betão Sikadur®-32+.

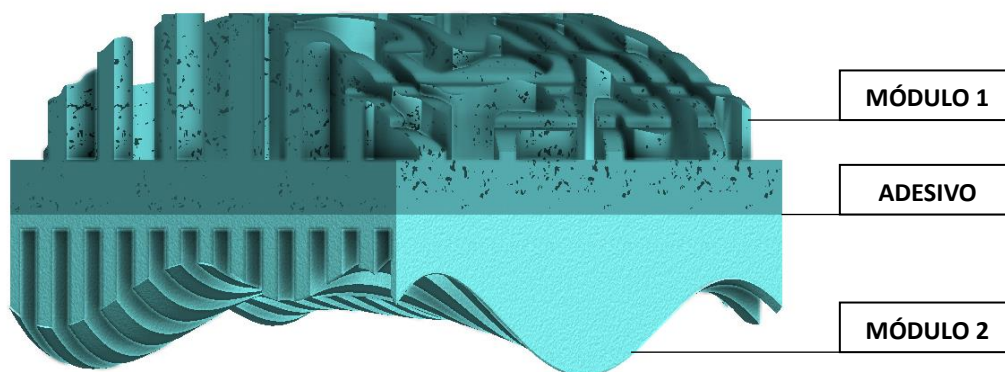


Figura 56. Sistema de fixação do coral, nomeadamente entre as duas partes existentes.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Na figura seguinte, adicionou-se a rede ao sistema tridimensional, de forma a visualizar a sua inclusão no coral. Como é possível observar na figura 57, desintegrou-se tridimensionalmente o módulo 1 para ilustrar a inclusão da rede no mesmo. Este procedimento apenas foi possível, visto que se utilizou um processo de impressão 3D. Este processo possibilitou, como irá ser discutido posteriormente, a paragem do processo de impressão para a alocação da rede entre camadas.

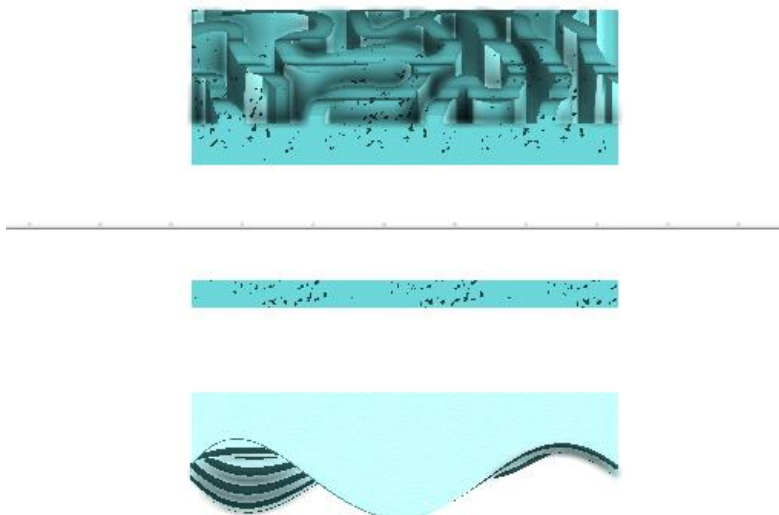


Figura 57. Vista explodida do sistema coral-rede. Sistema de fixação coral-rede.

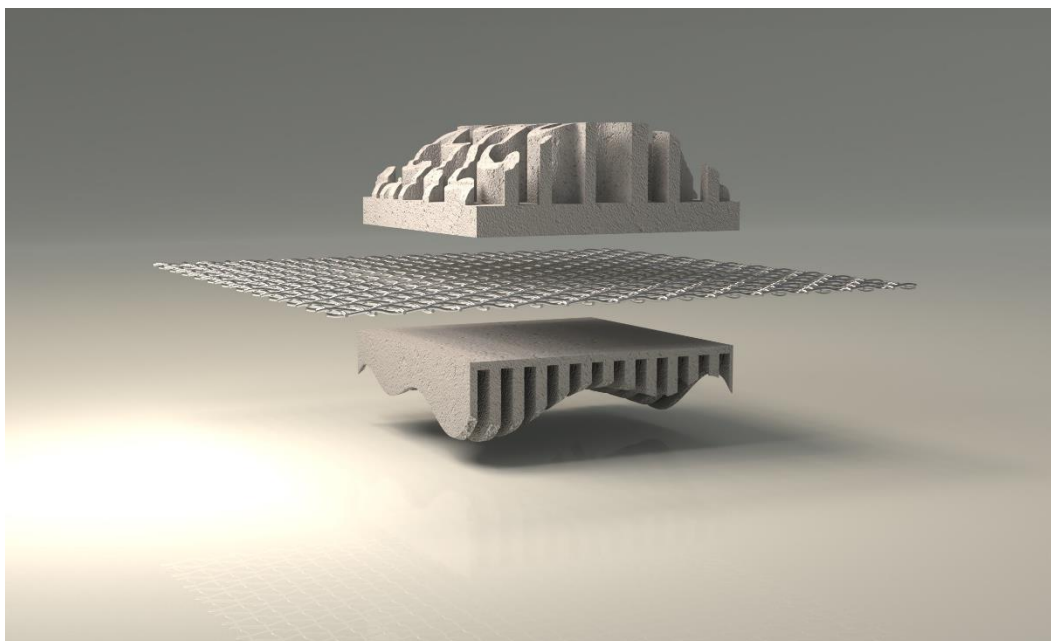


Figura 58. Render da vista explodida do sistema coral-rede.

3.8 Plano experimental

O plano experimental recorre a uma série de testes que tem presente dois objetivos primordiais:

- Entender como a integração de agregados influenciam as características da argamassa, de forma a maximizar a sua aplicação no estudo;
- Otimizar o processo de extrusão da argamassa na impressora 3D.

Tendo isto em conta, testar-se-ão combinações e proporções de materiais distintos, de modo a encontrar uma fórmula que reaja positivamente ao processo de extrusão, bem como à sua inclusão em ambiente marinho.

O plano experimental seguirá uma estrutura que divide o processo em quatro fases (Figura 59): Preparação do material; estudo do material; calibração; impressão.

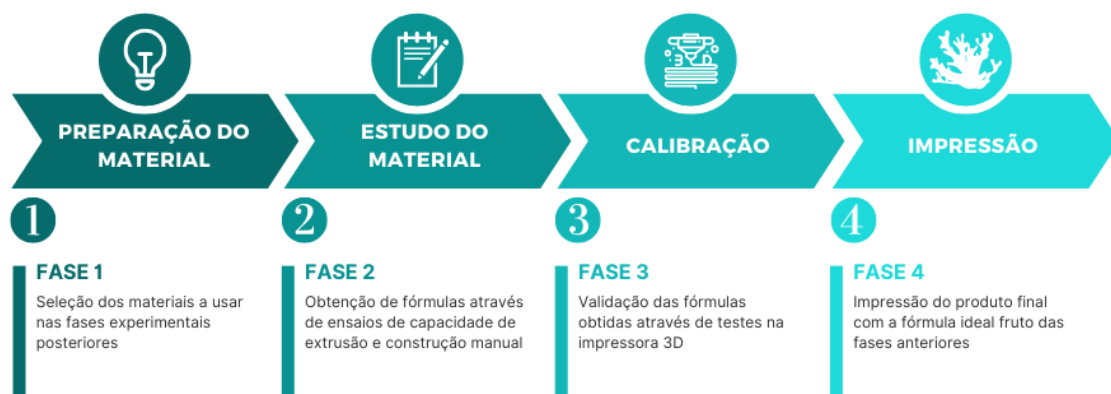


Figura 59. Divisão do plano experimental em quatro fases: Preparação do material; estudo do material; calibração; impressão.

3.8.1 Caraterização do material

A etapa primordial do plano experimental conta com a preparação de todo o material necessário para a execução dos processos experimentais posteriores, nomeadamente no tratamento e classificação da matéria-prima que será utilizada. Tendo isto em conta, é importante perceber que materiais serão utilizados na preparação de amostras de argamassa, bem como na execução do protótipo do CA (Figura 60).



Figura 60. Materiais utilizados no período experimental do estudo.

Cimento CEM I 42,5 R:

Os cimentos hidráulicos, compostos principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, são amplamente reconhecidos como os ligantes mais importantes na construção civil. O cimento Portland (PC) destaca-se como o mais utilizado entre eles. Embora novos tipos de cimentos tenham surgido, como os à base de geopolímeros, o principal material ligante utilizado no betão para impressão 3D (3DPC) é o cimento Portland, que constitui o foco deste estudo.

Um artigo (Fonseca & Matos, 2023) conduziu uma revisão bibliográfica a 157 projetos de misturas de 3DPC, e revelou que o cimento Portland tipo I é o mais utilizado, representando 40,1% das misturas. Em seguida, aparece o CEM II, com 12,1% de utilização, e uma menor proporção de misturas empregou o CEM tipo III. Quanto à classe de resistência, a maioria dos estudos indicou a utilização da classe 42.5. Estes dados, apesar de limitados pela falta de informações completas, fornecem uma visão geral das escolhas predominantes no desenvolvimento de misturas para impressão 3D em betão (Figura 61).

Para o trabalho em questão, foi utilizado um cimento CEM I 42,5 R, um cimento de endurecimento rápido, composto por $\geq 95\%$ de clínquer finamente moído, $\leq 5\%$ de constituintes secundários adicionais e sulfato de cálcio como regulador de endurecimento (Cimpor, 2023).

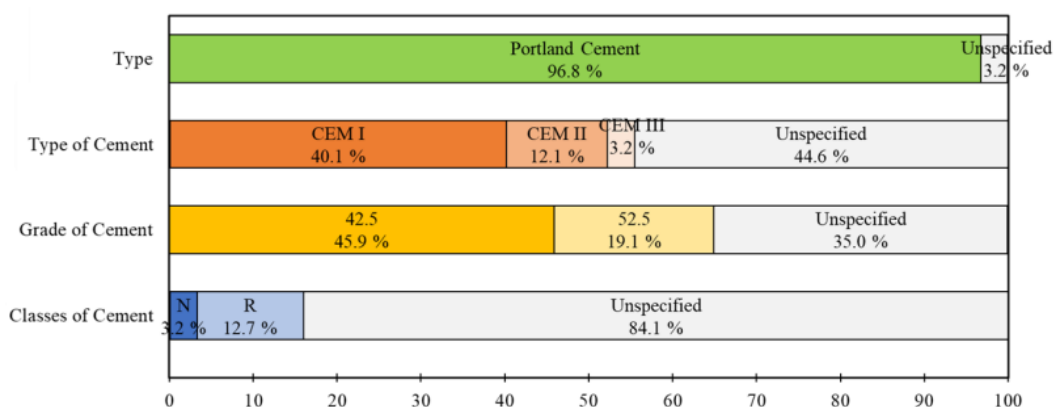


Figura 61. Dados estatísticos retirados de um artigo, revelando os tipos, graus e classes de cimento mais utilizados numa amostra de 157 projetos publicados na comunidade científica (Fonseca & Matos, 2023).

Agregados Aglutinantes:**a) Concha de mexilhão**

Este estudo reaproveitou desperdício de concha de mexilhão, ao adquirir cerca de 40kg de conchas *Mytilus* (Figura 62) não triturada, oriunda da empresa Finisterra S.A. A sua composição, predominantemente composta por carbonato de cálcio e menos de 5% de matéria orgânica, está descrita na Tabela 22, com base na literatura (el Biriane & Barbachi, 2020).



Figura 62. Granulometria padrão da concha, disponibilizada pela Finisterra.

Tabela 22. Composição química da concha de mexilhão.

Composição química da Concha de Mexilhão (% em peso)	
CaO	95,7
K ₂ O	0,5
SiO ₂	0,9
SrO	0,4
Fe ₂ O ₃	0,7
SO ₃	0,7
MgO	0,6
Al ₂ O ₃	0,4

Estas conchas sofreram, numa fase inicial, uma trituração recorrendo à utilização de um moinho de martelos de impacto SK100 da RETSCH, destinado à moagem de materiais moles e semiduros (Figura 62). Este equipamento utiliza malhas metálicas de crivagem no seu interior, de modo a definir-se a dimensão do grão processado. Para este estudo foram utilizadas duas malhas, de 2mm e 4mm. Tendo em conta as características do material, nomeadamente a sua fragilidade, e apesar da utilização de malhas de crivagem de pequenas dimensões, denotou-se que o material, antes mesmo de passar a malha, estaria já parcialmente triturado. Por esta razão, a granulometria conseguida foi bastante irregular, obtendo-se uma mistura entre pó fino e concha com granulometria significativa.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

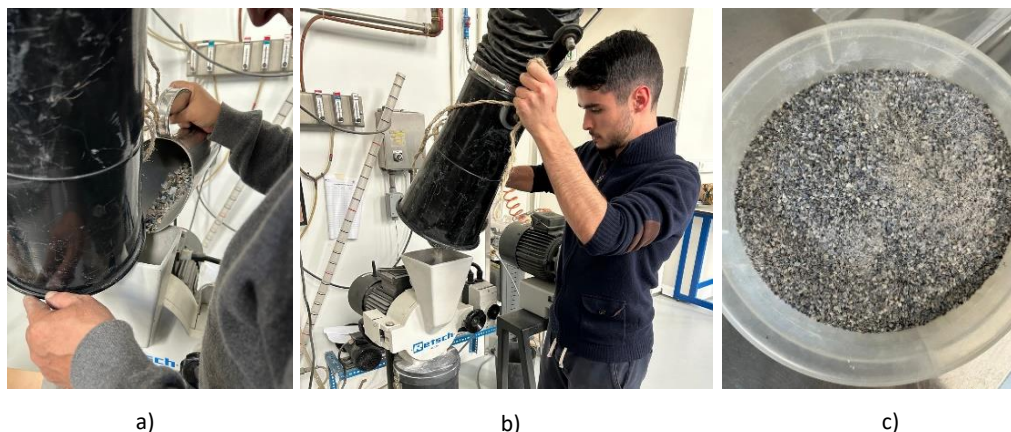


Figura 63. Trituração do material concha de mexilhão. a) Introdução do material no moinho de martelos SK100; b) Absorção de poeiras resultantes da trituração; c) Granulometria irregular obtida.

Após este processo, e com humidade e tamanho variados devido à fragmentação, foram peneiradas em duas categorias recorrendo-se a uma peneira vibratória digital (Figura 63 a)): inferior a 850 μm ; e superior 850 μm . Posteriormente foi necessário realizar uma segunda fase de categorização da concha, categorizando-se em: superior 850 μm e inferior a 1180 μm ; e superior a 1180 μm (Figura 64 b)).

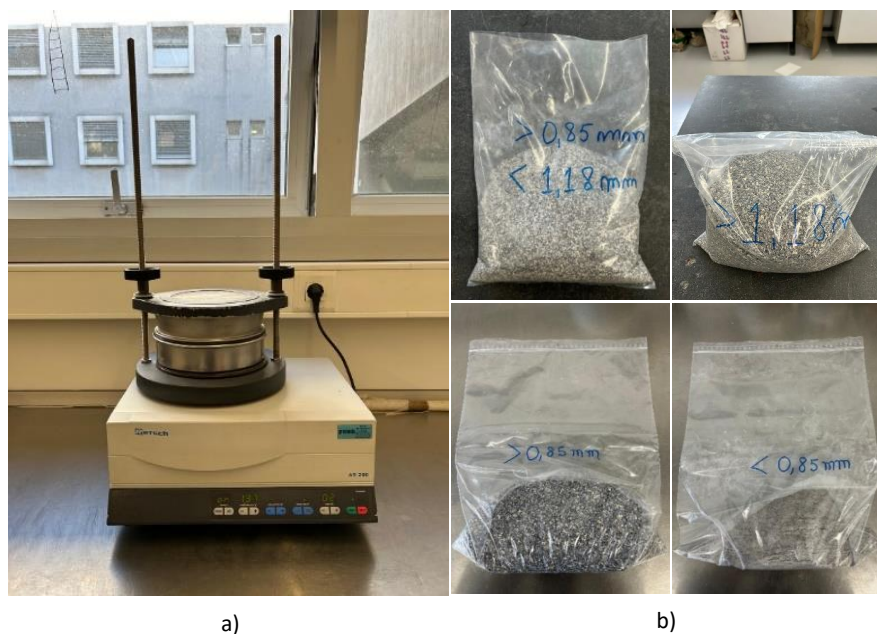


Figura 64. Processo de peneiramento do material concha de mexilhão. a) Agitador de peneiros digital; b) Amostras com as diversas granulometrias referidas.

Materiais Pozolânicos*¹:

Os materiais pozolânicos, nomeadamente pó de tijolo e metacaulino, foram selecionados pela sua capacidade de interagir com o hidróxido de cálcio e reduzir o teor de cimento *Portland**². O pó de tijolo foi obtido a partir de resíduos minerais, de construção e agrícolas, providenciados pelo Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os materiais foram fornecidos em pó, com a exceção do tijolo que sofreu um processo de trituração e posterior classificação, ilustrado na figura 65.



Figura 65. Antes e após o processo de trituração do tijolo, de forma a obter o material desejado para o procedimento experimental, o pó de tijolo.

*¹Materiais pozolânicos - São materiais silicosos com pouca ou nenhuma atividade aglomerante. Quando em contacto com água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar produtos com propriedades cimentícias.

*²Cimento *Portland* - Foi observado que este material conduz a uma prevalência de algas vermelhas incrustantes não coralinas, apresenta uma correlação negativa com o recrutamento de corais (Leonard et al., 2022).

3.8.1 Impressão 3D

Tendo em elevada consideração o favorecimento de superfícies de elevada textura para maiores índices de atração marinha (Chou, 1997), a opção pela utilização de tecnologias de manufatura aditiva, nomeadamente de impressão tridimensional, revelou-se ser a mais apropriada. Com isto, atribui-se uma elevada liberdade geométrica ao produto final, com a possibilidade quase total de modificação em tempo real, garantindo-se ainda um baixo custo de matéria-prima e de mão de obra.

Assim sendo, para este processo recorreu-se à utilização da impressora 3D Delta Wasp 40100 LDM (Figura 66 a)) (*Liquid Deposition Modeling*), uma extrusora de alimentação manual e abastecimento contínuo de materiais cimentícios de elevada tixotropia- diminuição da viscosidade de alguns fluidos quando são agitados- garantindo uma elevada maneabilidade de materiais de maior consistência. Os parâmetros de impressão utilizados para o processo experimental estão indicados na Tabela 23.

Tabela 23. Parâmetros de impressão para o fabrico da peça.

Parâmetros de Impressão	Valor
Diâmetro do bocal [mm]	12
Volume de impressão cilíndrica [mm]	Ø 400 x h 1000
Altura mínima de camada [mm]	3
Velocidade de impressão [mm/s]	40

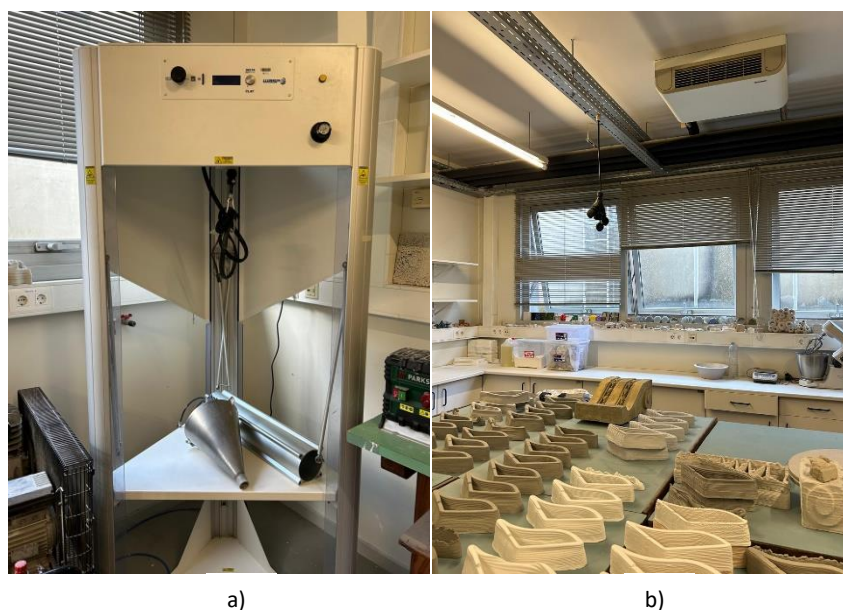


Figura 66. Condições experimentais. a) Impressora Delta Wasp 40100; b) Laboratório H102.

3.8.2 Desenvolvimento do material

Como abordado anteriormente, a fase do estudo do material focar-se-á na elaboração de amostras de argamassa de forma a validar uma composição de material adequada, por um lado, ao *design* do produto e, por outro, à sua construção através de um processo de manufatura aditiva.

O estudo efetuado será dividido em dois momentos (Figura 67), que representam duas fases distintas do processo de desenvolvimento do material. No primeiro momento, serão testadas amostras através do processo de extrusão manual. No segundo momento, as amostras que apresentem melhores resultados serão validadas e sujeitas a novos testes, desta vez na impressora 3D. Ambos os momentos serão aplicados o número de vezes proporcional ao número de materiais pozolânicos testados, visto que é a única alteração que se efetuará em termos de composição. Assim, M1.M representa a extrusão manual de amostras com o material pozolânico metacaulino.



Figura 67. Divisão do estudo do material em dois momentos.

Requisitos de desempenho para impressão

Apesar da elevada adaptabilidade das argamassas a sistemas de impressão tridimensional, estas devem ser ajustadas às características do sistema de impressão a usar. O betão utilizado na impressão 3D passa pelas fases de bombagem, extrusão e deposição camada a camada. Estas fases exigem características especiais de uma mistura de betão para satisfazer as necessidades sofisticadas do processo de impressão, que são definidas a seguir (Rehman & Kim, 2021; Teixeira, 2018):

1. **“Pumpability”** – Refere-se à trabalhabilidade do material após o fim da amassadura e define todo o processo de impressão. Propriedade afetada por fatores como a temperatura e humidade;
2. **“Extrudability”** – Refere-se à habilidade que assegura a passagem de filamentos contínuos e estáveis através do bocal sob pressão, imprimindo um filamento sem rutura;
3. **“Buildability”** – Refere-se à habilidade em imprimir camadas sucessivas de 3DPC sem deformação excessiva ou colapso.

Estas propriedades em conjunto estão habitualmente associadas à “printability” da mistura, que define a sua qualidade para o processo de impressão. Alguns destes requisitos são afetados por fatores ambientais, podendo estes dificultar o atingir de uma mistura equilibrada e preparada para a impressão.

Estes fatores estão geralmente associados a variáveis relacionadas com a geometria da peça e parâmetros de impressão (Ma et al., 2017). Teixeira define uma relação circular entre os parâmetros do material, de impressão e a geometria de peça, onde existe uma influência direta entre si (Teixeira, 2018). Por exemplo, a obtenção de parâmetros de material otimizados são determinantes para se obterem melhores parâmetros de impressão. Estes parâmetros incluem variáveis como a velocidade de impresso e liberdade dos movimentos (figura 68).

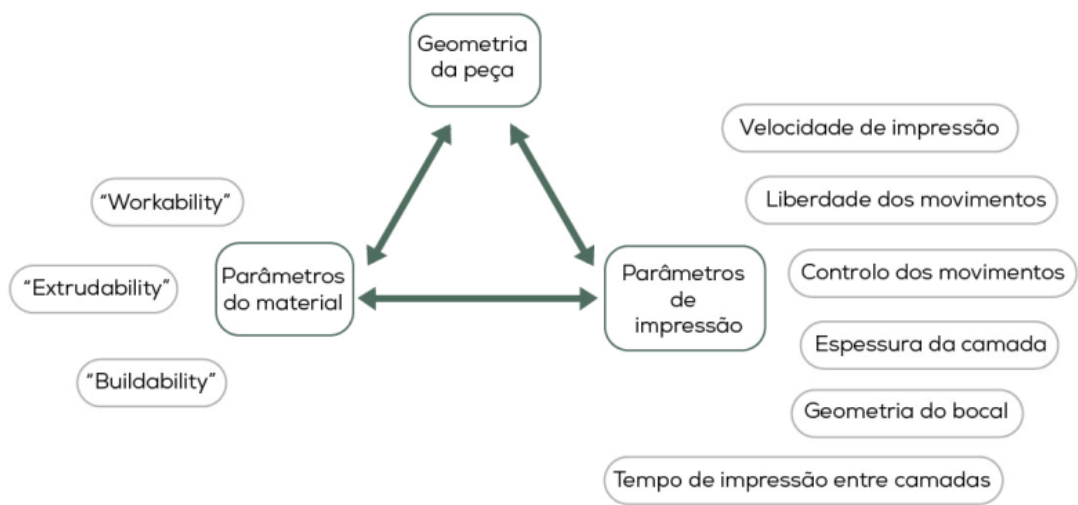


Figura 68. Relação entre parâmetros que definem a qualidade da impressão, segundo (Teixeira, 2018).

Composição das argamassas para impressão

As composições utilizadas neste trabalho partiram, como discutido anteriormente, das composições apresentadas no caso de estudo de Matus (2024). As argamassas testadas (Valenzuela Matus et al., 2024) diferem apenas num material, sendo a argamassa A e B composta por Metacaulino e Pó de Tijolo, respetivamente. Em ambas as argamassas há a adição do adjuvante superplastificante, uma vez que permitiu alcançar relações água/cimento mais baixas, aumentando a resistência no seu estado endurecido (Teixeira, 2018).

Tabela 24. Definição dos constituintes das argamassas a serem estudadas.

Argamassa A	Argamassa B
Cimento (CEM I 42.5 R)	Cimento (CEM I 42.5 R)
Concha de Mexilhão	Concha de Mexilhão
Metacaulino	Pó de Tijolo
Água	Água
Superplastificante	Superplastificante

Testes de Impressão

O primeiro momento dos testes de impressão inclui os testes de extrusão manual, onde se realizaram testes básicos com saco pasteleiro, de forma a ajustar a consistência das argamassas testadas. Os ensaios foram realizados para 500g de material sólido, dependendo da quantidade de material que se pretendeu testar. Os tempos das misturas variaram entre os 5 e os 10 minutos, de acordo com as necessidades de cada teste. No momento 1, relativo aos testes de impressão manual, foram testadas 7 amostras diferentes da argamassa A e 4 relativas à argamassa B. Estes, viabilizaram apenas a execução de amostras relativas à argamassa A (Tabela 25).

Tabela 25. Quantificação dos testes de impressão realizados, de acordo com o tipo de argamassa utilizada e momento.

	Argamassa A	Argamassa B
Momento 1	7 amostras	4 amostras
Momento 2	6 amostras	----

Como método de organização, foram atribuídas designações a todas as formulações de argamassa, de acordo com o tipo de agregado utilizado. Por exemplo, "M.1" designa a primeira amostra de uma mistura de concha de mexilhão, cimento Portland CEMI 42,5 R e metacaulino.

Tabela 26. Momento M1.M. Sequência de amostras de extrusão manual da argamassa A.

Proporções de argamassa com concha de mexilhão (% em peso)							
	<850 µm	(>850 <1180) µm	>850 µm	CEM I 42,5 R	Metacaulino	Água	Plastificante
M.1	35	----	15.5	33	16.5	38.5	----
M.2	35	----	15.5	33	16.5	36	----
M.3	35	----	15.5	33	16.5	31	0.4
M.4	50.5	----	----	33	16.5	31	0.4
M.5	50.5	----	----	33	16.5	33	0.4
M.6	35	15.5	----	33	16.5	31	0.4
M.7	35	15.5	----	33	16.5	33	0.4



Figura 69. Primeiro set de amostras efetuadas, inseridas em M1.M.

Os primeiros testes experimentais testaram a viabilidade das amostras utilizando metacaulino, mantendo-se a sua percentagem constante ao longo de todas as amostras (16.5%). Por outro lado, testaram-se diversas percentagens na utilização de concha de mexilhão como matéria-prima, nomeadamente na conjugação de diferentes granulometrias. Do mesmo modo, variou-se a composição da água ao longo dos testes, com o objetivo de se atingir argamassas otimizadas a nível de viscosidade e extrusão. A adição de um plastificante mostrou-se crucial para reduzir a quantidade de água necessária na mistura, visando melhorar sua trabalhabilidade e viabilidade para extrusão.

As três primeiras amostras (M.1, M.2, M.3) demonstraram desde logo resultados satisfatórios durante o processo de extrusão manual, com destaque para a amostra M.3, que apresentou a melhor desempenho. Contudo, a tentativa embrionária da utilização destas amostras na impressora revelou uma limitação significativa devido à granulometria da concha, que revelou ser acima do desejável. A concha com granulometria superior a 850 μm inviabilizou a saída da argamassa, levando ao entupimento do bocal da impressora. Diante esta limitação, foi necessário reavaliar a abordagem, optando-se por categorizar novamente a concha, garantindo uma granulometria máxima de 1180 μm para os testes posteriores. Com isto, pretendeu-se eliminar granulometrias superiores a 1180 μm . Assim sendo, todos os testes realizados após este momento recorrem à utilização de apenas duas categorias de concha (<850 μm ; >850 μm ^ <1180 μm).

As amostras M.4 e M.5 representam os primeiros testes apenas com a utilização de pó de concha, i.e., com granulometria <850 μm . Estas amostras apresentaram bons resultados na extrusão manual, sendo, porém, notório uma maior absorção de água pelo material (devido à inexistência de granulometria), tornando as misturas mais espessas e viscosas, o que impossibilitaria a extrusão na impressora.

Na amostra M.6 testou-se, novamente, uma conjugação de granulometrias, sendo que os resultados revelaram bons indicativos durante a extrusão manual, nomeadamente uma boa fluidez de filamento, bem como boas características texturais. No entanto, e após decisão de se testar a mistura M.6 na impressora, a mesma revelou-se demasiado espessa para extrusão, notando-se bastante dificuldade a sair pelo bocal da extrusora. Posto isto, na amostra M.7 optou-se por um incremento de cerca de 6,1% de água, equivalente a dez gramas. Os resultados iniciais revelaram uma fluidez mais adequada ao bocal da impressora e uma deposição de camadas interessante (Figura 70).

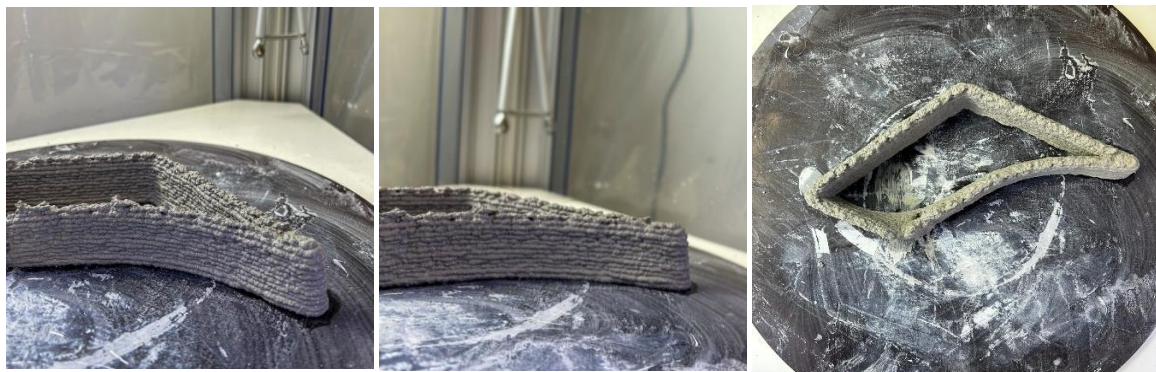


Figura 70. Testagem da amostra M.7 na impressora 3D, segundo uma geometria aleatória. Avaliação de parâmetros como a deposição de camadas, fluidez do material, entre outros.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

No entanto, após alguns dias de observação (Figura 71) e consequente período de secura, foi possível concluir, sobretudo através do toque e manuseamento da peça, que a mistura apresentava uma secura acima do desejado. Isto afetou diretamente a sua performance estrutural, corroborado pelo esfarelamento de algumas zonas da peça. Tendo isto em conta, procedeu-se à execução de novas misturas (Tabela 27), tendo como principal objetivo atingir uma maior coesão estrutural.

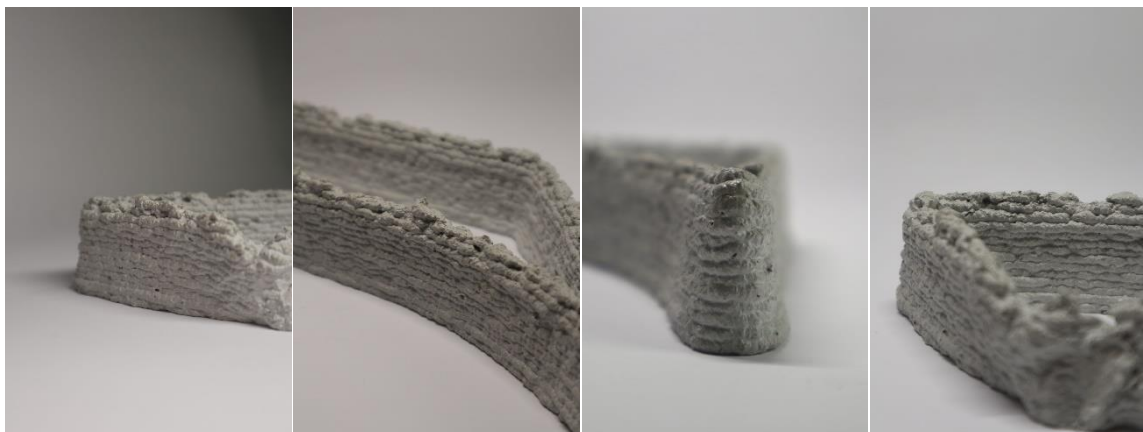


Figura 71. Observação de resultados da amostra M.12, após alguns dias de repouso e secura.

Tabela 27. Momento M2.M. Ajuste das composições relativas à argamassa A e validação de resultados a partir da extrusão na impressora.

Proporções de argamassa com concha de mexilhão (% em peso)							
	<850 µm	(>850 <1180) µm	>850 µm	CEM I 42,5 R	Metacaulino	Água	Plastificante
M.8	35	15.5	----	33	16.5	33	0.6
M.9	35	15.5	----	33	16.5	29.8 (0,9 CEM)	0.6
M.10	35	15.5	----	33	16.5	28.1	0.6
M.11*	35	15.5	----	33	16.5	28.7	0.6
M.12*	50.5	----	----	33	16.5	28.7	0.6
M.13*	50.5	----	----	33	16.5	28.7	0.58

*Amostras realizadas para 1000g de material sólido

As misturas M.8, M.9 e M.10 são alvo de um ajustamento das variáveis como a água e plastificante, onde se pretendia obter um compromisso entre coesão das camadas. Além disso, pretendia-se oferecer melhores características mecânicas ao filamento. Na análise dos resultados (Figura 72) é notório algum desajuste textural, caracterizado por uma elevada porosidade, o que pode afetar a resistência do filamento.

As amostras M.11 e M.12 foram, por sua vez, realizadas para uma composição de 1000g de material sólido, uma vez que se pretendia terminar a impressão da peça teste. Na amostra M.12 optou-se por retomar a testagem apenas com a presença de pó de concha de mexilhão, i.e., sem granulometria significativa (>1mm), com alguns ajustes que se foram efetuando nas quantidades

de água e plastificante. Nesta amostra, e ao contrário do que foi demonstrado em M.4 e M.5, obteve-se um excelente compromisso entre fluidez, viscosidade e textura, tendo sido a impressão mais promissora para se iniciar os testes de impressão do protótipo do coral.



Figura 72. Impressão de amostras relativas ao segundo momento do procedimento experimental, onde se observam as características visuais das camadas referentes às amostras M.8, M.9, M.10, M.11 e M.12.

Tendo em conta o estudo anterior (Valenzuela Matus et al., 2024), o pó de tijolo revelou igualmente ser um componente pozolânico capaz de oferecer bons resultados. Por essa mesma razão, iniciaram-se misturas com este componente, agora em detrimento do metacaulino, de forma a avaliar o impacto que poderá ter na extrusão e performance dos filamentos. Com isto, será importante perceber as diferenças que ambos os componentes atribuem às argamassas conseguidas, e com isso retirar conclusões que permitam a seleção da mistura com melhores características e potencialidade.

Tabela 28. Momento M1.P. Execução das primeiras amostras utilizando o material pozolânico pó de tijolo.

Proporções de argamassa com concha de mexilhão (% em peso)							
	<850 µm	(>850 <1180) µm	>850 µm	CEM I 42,5 R	Pó de Tijolo	Água	Plastificante
P.1	55.5	----	----	33	16.5	38.5	0.4
P.2	55.5	----	----	33	16.5	26.4	0.4
P.3	55.5	----	----	33	16.5	23.1	0.4
P.4	35	15.5	----	33	16.5	23.1	0.4

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes



Figura 73. Primeiro set de amostras efetuadas, inseridas em M1.P.

O teste resultou na impressão manual de apenas quatro exemplares representados na figura 73 e todas foram impressas aos cinco minutos (após a amassadura). Todas as amostras apresentam resultados pouco conseguidos a nível da estrutura do filamento, o que afetou o processo de controlo de impressão, apresentando por isso baixos níveis de “extrudability”, não se alcançando o controlo e a estabilidade necessária na passagem pelo bocal. Desta feita, todos os exemplares apresentam uma clara deformação e fluidez excessiva. Aproximadamente um dia após a impressão, detetaram-se níveis de porosidade interessantes em todas as amostras, especialmente na P.4 (figura 74), o que poderia ser um indicativo a apostar em amostras futuras. Não obstante, dada a necessidade de se reajustar de forma significativa a relação água/cimento da composição, e tendo em conta a obtenção de resultados promissores com a argamassa A, optou-se por terminar os testes de impressão com a argamassa B.



Figura 74. Observação de porosidade após período de secura, em amostra P.4.

3.8.3 Conclusões

Para que se reúnam condições ótimas para a impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios, chegou-se à conclusão que é necessário que o material seja validado em três requisitos, nomeadamente “pumpability”, “extrudability” e “buildability”. Dessa forma, o sistema de impressão deve ser capaz de extrudir e depositar o material de forma controlada, evitando deformações no filamento.

Para cumprir com estes requisitos, foram executados em primeiro lugar testes de extrusão manual de filamentos, relativos às argamassas A e B. Baseado nestes testes, concluiu-se que a inclusão de agregados diferentes (metacaulino e pó de tijolo) tem influência na trabalhabilidade da argamassa. De acordo com a análise dos resultados, comprovou-se que a impressão das amostras da argamassa A apresentam melhor “extrudability” e “buildability” do que a argamassa B. Por essa razão, prosseguiram-se os testes na impressora apenas com a primeira.

Após a validação da argamassa A, executaram-se testes de extrusão na impressora *Delta Wasp 40100* para as respetivas composições validadas. Baseado nestes testes, concluiu-se que a transição de extrusão manual para automática exige um ajuste das composições de modo a preservar os requisitos de desempenho para impressão. Nos ensaios na impressora foi concluído que a presença de pó de concha de mexilhão sem granulometria efetiva proporciona melhores acabamentos em relação às amostras que utilizam concha com granulometria. Durante estes ensaios, comprovou-se a viabilidade da amostra M.13, que apresentou os melhores requisitos de impressão para a composição apresentada na figura 75.

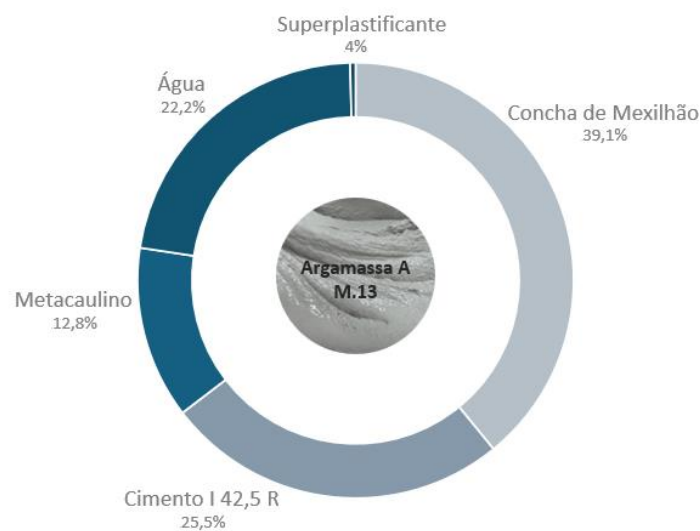


Figura 75. Composição da amostra selecionada para a fase de prototipagem em *Wasp 40100*.

Finalmente, realça-se a influência do superplastificante que, como é possível observar pela análise das tabelas, permitiu diminuir a relação cimento/água. Prova disso é a descida de uma percentagem de 38% de água na amostra M.1 (sem inclusão de superplastificante) para 33% na amostra M.7 (com inclusão de superplastificante). Apesar de não terem sido realizados testes experimentais para análise de resistência entre amostras, estima-se que as amostras tenham obtido progressivamente mais resistência com a adição de superplastificante.

De forma a concluir o estudo do material, desenvolveu-se um sistema de pontuação com a finalidade de classificar todas as amostras efetuadas no procedimento experimental. Este sistema quantifica, de 1-5, todas as amostras de acordo com os requisitos de desempenho para impressão, sendo eles: “pumpability”, “extrudability” e “buildability”. O resultado é determinado pela média ponderada destes parâmetros, representando a qualidade final da amostra. Deste modo, é possível estabelecer uma relação entre todas as amostras efetuadas, clarificar as decisões efetuadas durante o processo de estudo do material e justificar a escolha do material final. Através da sua análise é possível, de igual forma, concluir a validação da amostra M.13 pertencente à argamassa A, uma vez que apresentou os melhores resultados dos parâmetros previamente discutidos. Assim sendo, válida a sua utilização para a prototipagem do CA.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Tabela 29. Sistema de pontuação das amostras que utilizaram metacaulino na sua composição.

	M.1	M.2	M.3	M.4	M.5	M.6	M.7	M.8	M.9	M.10	M.11	M.12	M.13	
														
Tipo de impressão	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Wasp 40100	Wasp 40100					Wasp 40100	
"Pumpability"														
"Extrudability"														
"Buildability"														
Resultado	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	4/5	3/5	5/5	5/5	5/5	

Tabela 30. Sistema de pontuação das amostras que utilizaram pó de tijolo na sua composição.

	P.1	P.2	P.3	P.4
				
Tipo de impressão	Manual	Manual	Manual	Manual
"Pumpability"				
"Extrudability"				
"Buildability"				
Resultado	2/5	2/5	1/5	2/5

3.9 Protótipo

Após se atingirem resultados promissores nas características da amostra M.13 no momento da extrusão, optou-se por testar a sua viabilidade na elaboração do primeiro protótipo do coral. Após a pesagem de todos os componentes (Figura 76 a)), iniciou-se o processo de amassadura da argamassa numa misturadora convencional, de acordo com o procedimento ilustrado na figura 77.

A mistura teve uma duração total de 5 minutos, contando com uma paragem intermédia aos 2.5 minutos onde se retirou o material aderente das paredes e das pás. O restante tempo serviu para uniformizar a mistura e para que a mesma pudesse evoluir para as características desejadas. Conforme é possível verificar na figura 76, de b) para c), com a inclusão de superplastificante a mistura começa por apresentar um aspeto seco, evoluindo para um estado mais fluído após influência do superplastificante. A inclusão deste material aumenta a tixotropia* da mistura. Esta propriedade proporciona maior fluidez no momento que é mexido pelo parafuso no extrusor o que facilita a extrusão.

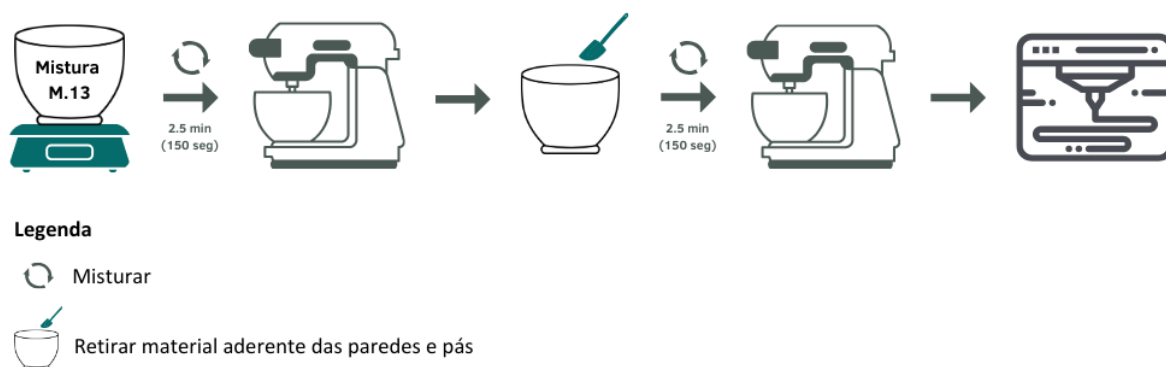


Figura 77. Processo de amassadura da argamassa.

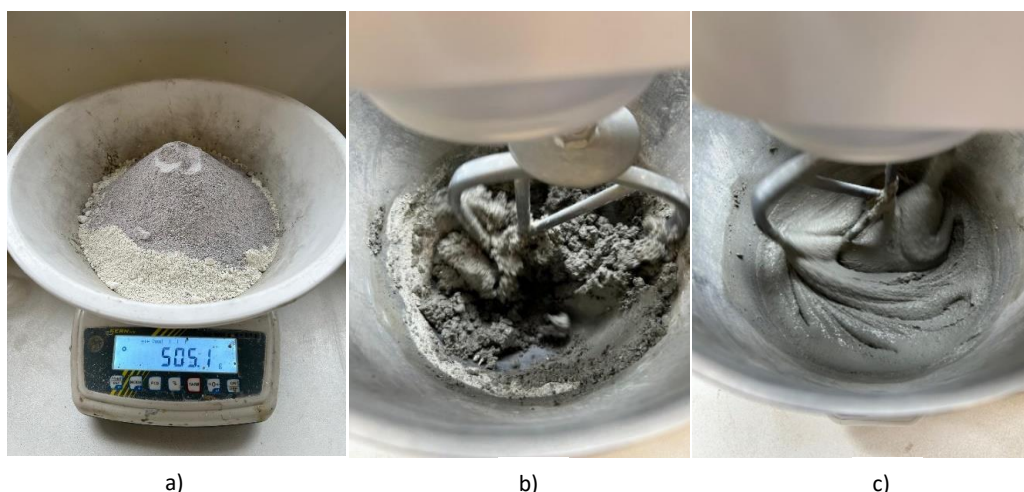


Figura 76. Processo de mistura dos materiais para a argamassa. a) Pesagem dos materiais; b) Primeiro momento do processo de mistura; c) Segundo momento do processo de mistura.

*Tixotropia - Diminuição da viscosidade de alguns fluidos quando são agitados.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Após a preparação da mistura estar finalizada, iniciou-se o processo de impressão para cada módulo da peça, correspondendo o módulo 1 e 2 à parte superior e inferior, respetivamente.

Módulo 1

Após colocação da mistura final no depósito de extrusão, iniciou-se o processo de impressão com o módulo 1, que se encontra dividido em três fases.

- Fase 1: Deposição de três camadas de material;
- Fase 2: Colocação da rede sobre essas camadas;
- Fase 3: Impressão da restante peça.

Tendo em conta o desenvolvimento da proposta estrutural do coral, optou-se pela colocação da rede de pesca entre a terceira e quarta camada da base de assentamento (Figura 78 b)), havendo a necessidade de se interromper o processo de impressão. Após a colocação da rede, retomou-se o procedimento e terminou-se a impressão do coral (Figura 78 c)). Para além disso, efetuaram-se interrupções unicamente com o propósito de abastecer o extrusor com material.

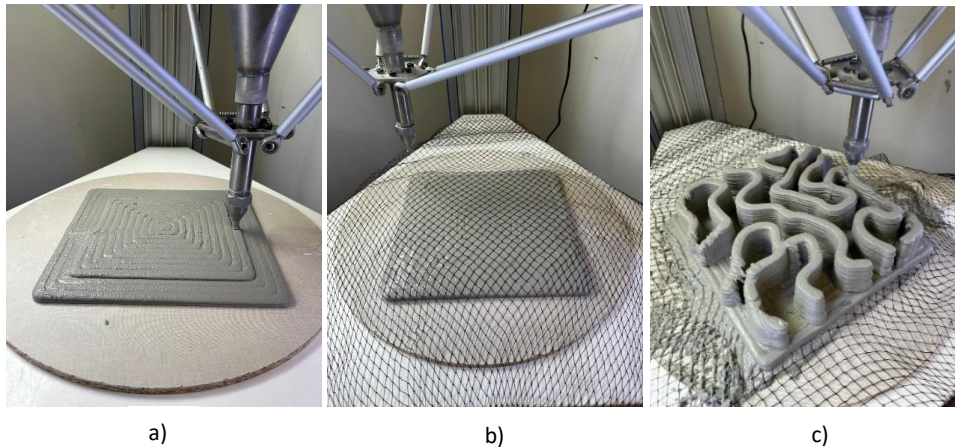


Figura 78. Processo de impressão do módulo 1 do protótipo de coral. a) Deposição das primeiras camadas; b) Deposição da rede por cima da terceira camada; c) Parte superior do coral impressa.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Módulo 2

De seguida, continuou-se o processo com a impressão do módulo 2. A figura 79 demonstra os três momentos da impressão, desde a extrusão das primeiras camadas até ao momento final.



Figura 79. Processo de impressão do módulo 2 do protótipo de coral.

Após o término da impressão de ambos os módulos, foram submetidos a processo de secagem total natural durante 28 dias, tempo estipulado para o início de testes experimentais com o produto.

Módulo 1



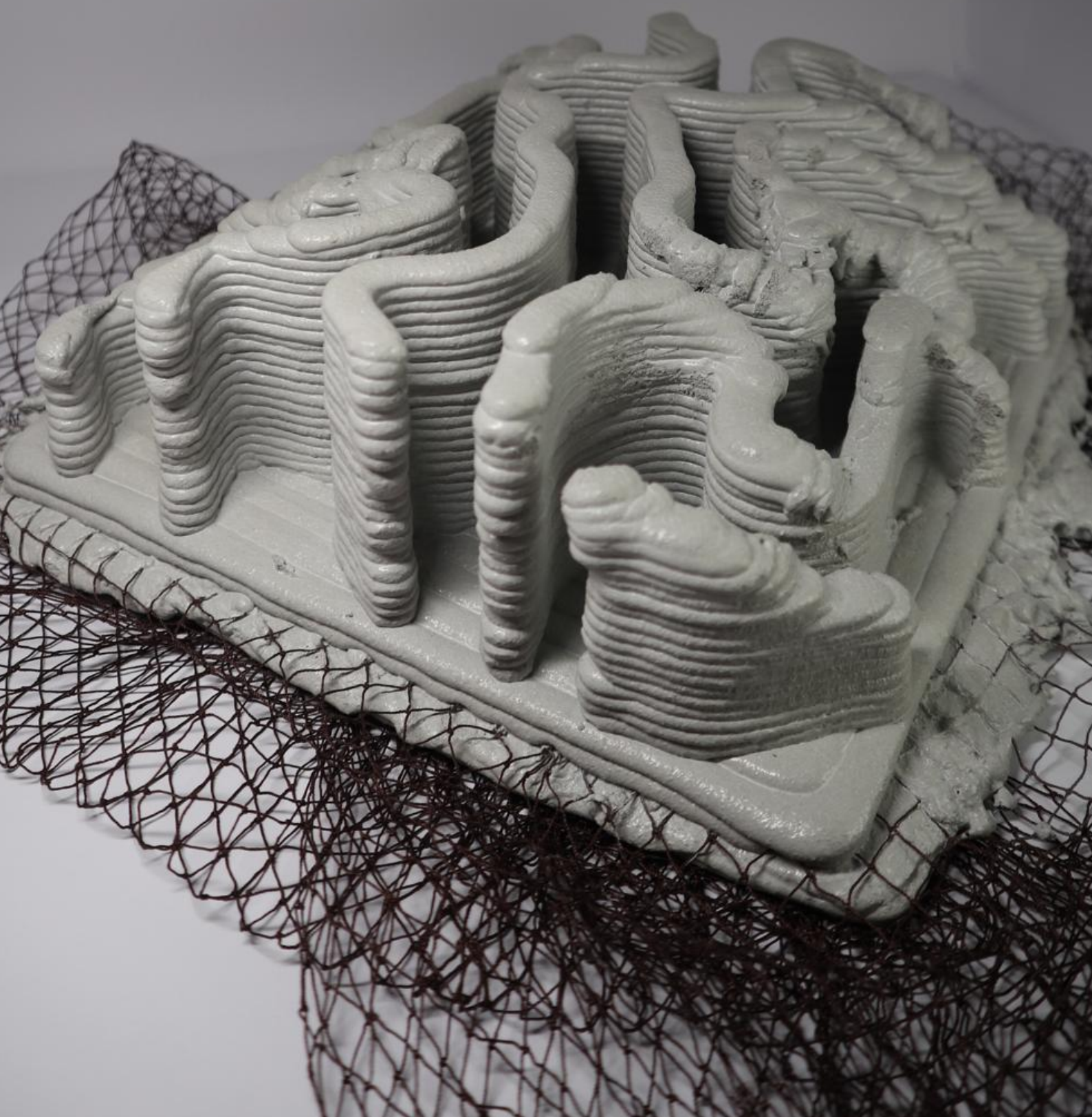
Figura 81. Pós-impressão Módulo 1.

Módulo 2



Figura 80. Pós-impressão Módulo 2.





3.9.1 Limitações detetadas

Após terminado o teste experimental do primeiro protótipo, existem algumas ilações a retirar acerca das limitações encontradas em várias vertentes do processo. Estas servirão como motivação para a elaboração de uma proposta otimizada e para a execução de um segundo protótipo.

No que toca ao momento de impressão, umas das maiores limitações encontradas foi no corte do filamento quando termina uma superfície. Apesar da mistura ser um compromisso ideal entre fluidez e viscosidade, o corte do filamento para início do filamento seguinte resulta no escorrimento de material no final de cada filamento, como mostra a figura 82. Como proposta de melhoria, foi pensado em desenvolver-se um *design* otimizado e capaz de eliminar esta limitação, onde se desenvolve o labirinto de forma que haja uma conexão entre os filamentos.

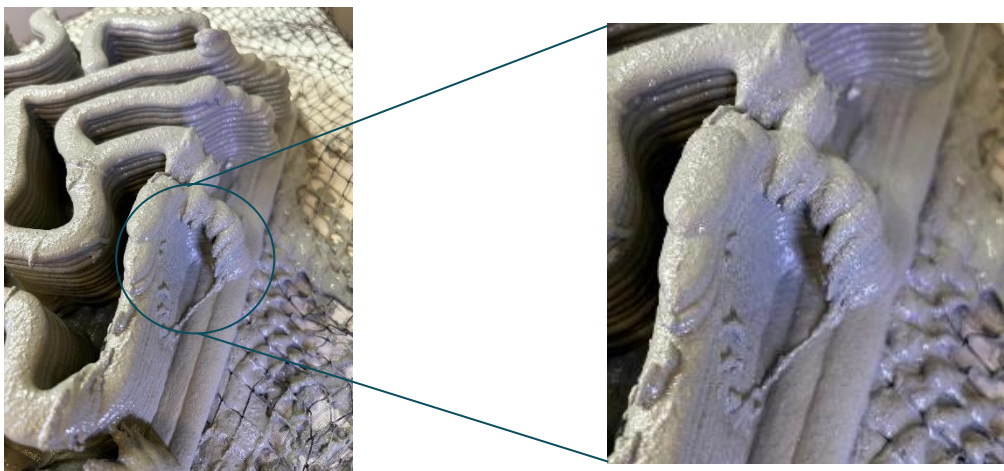


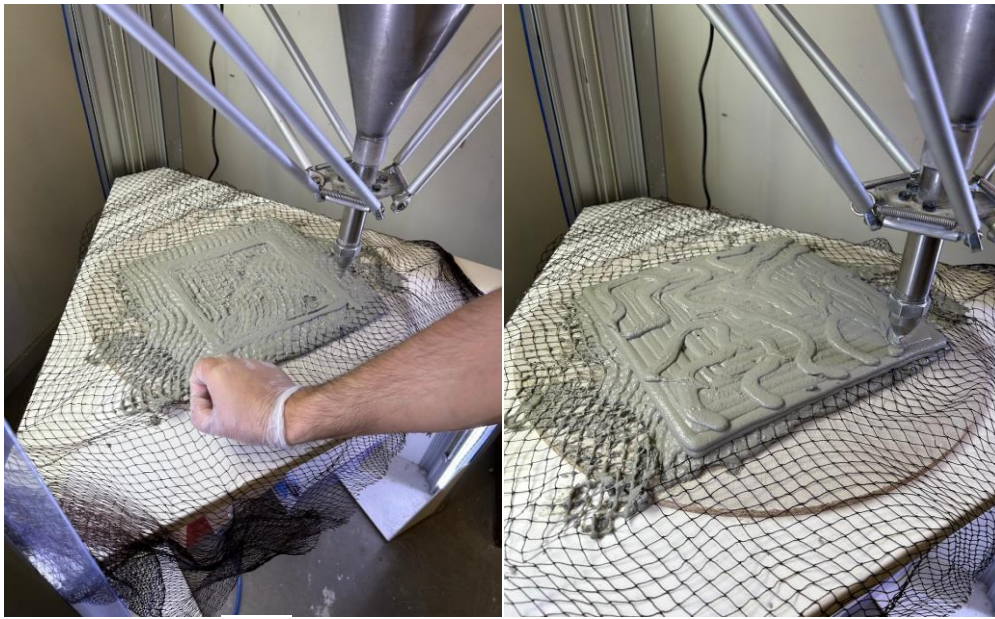
Figura 82. Escorrimento de material fruto do corte repentino do filamento para o início do filamento seguinte.

Outra limitação ao processo de impressão foi a quantidade máxima de material suportada no depósito da impressora. Tendo em conta que foram realizadas 6 amostras M.18 de 1kg cada, e a impossibilidade de garantir a uniformidade química da concha em todas as amostras, denotou-se ligeiras diferenças na extrusão das amostras, o que se poderá refletir em capacidades estruturais diferentes em pontos distintos da peça.

Por fim, outra limitação enfrentada foi a alocação da rede entre camadas. A sua deposição, por um lado, decorreu de forma esperada, sem problemas associados. Por outro lado, a extrusão da camada imediatamente posterior à terceira (onde se encontrava a rede) enfrentou alguns problemas quando em contacto com a rede, tendo existido pontos de engate com o bocal (Figura 83 a)). Esta situação levou a uma deformação parcial das camadas anteriores, não impossibilitando, no entanto, a restante impressão das camadas (Figura 83 b)). De forma a evitar este problema, seria interessante ter sido utilizado um tipo de rede diferente, com menor área de contacto. Além disto, poder-se-ia ter tensionado de forma mais eficaz a rede de forma a evitar os pontos de engate com o bocal.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes



a)

b)

Figura 83. Limitação na deposição de camadas sobre a rede de pesca. a) Engate do bocal de impressão na rede, provocando deslizamento de material; b) Deposição de camada posterior à situação de engate, continuando o processo de impressão.

3.9.2 Teste Experimental

De forma a testar a compatibilidade material com o meio marinho, iniciaram-se testes experimentais conduzidos pelo próprio, onde se inseriu o coral impresso numa piscina de água salgada. Os objetivos foram claramente delineados e passaram por observar diariamente a estrutura e determinar algum tipo de alteração ocorrida a nível estrutural. Estas alterações estimaram-se ser sobretudo possíveis deformações da superfície, bem como alterações texturais da mesma. Com isto, pretendeu-se validar a composição de argamassa utilizada em contexto real simulado.

É de notar que os dados que serão apresentados são relativos a uma amostra de curta dimensão, relativo a oito dias de observação, pelo que deve existir uma certa apreensão no momento da análise dos resultados atingidos.

O primeiro passo da metodologia foi de adquirir água salgada suficiente e necessária para cobrir o coral, o que passou pela obtenção de cerca de 35 garrafões de 6L cada (figura 84 a)), o que fez a utilização de 210L de água utilizados. Esta foi obtida com recurso a uma praia de água salgada. O passo seguinte passou por encher a piscina. Além da água, foi colocado algum plâncton encontrado na costa para efeitos de contexto (figura 84 b)).



Figura 84. Teste experimental conduzido pelo autor. a) Obtenção de água salgada através do enchimento de garrafões; b) Iniciação do teste experimental com a colocação do coral na piscina.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

Após os oito dias de observação, concluiu-se que o material apresentou uma resposta positiva à reação com a água salgada, não apresentando deformações e esfarelamentos. Além disso, manteve a sua aparência visual intacta, assim como a sua coloração (Figura 85). Tendo em conta o curto espectro temporal do teste, estes resultados serviram apenas para validar a realização de novos testes, ou até para validar a extensão deste mesmo estudo. Tendo isto em conta, existem bons indicativos, quer da parte do desenvolvimento do material quer do teste experimental, na utilização da composição M.13 da argamassa A para futuros testes em contexto real e/ou simulado.

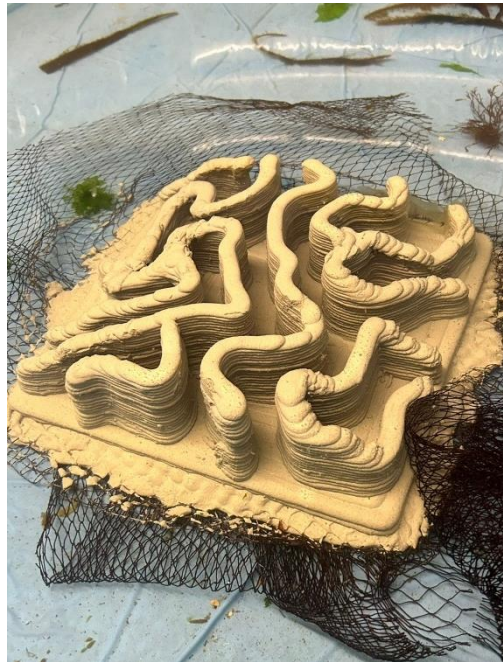


Figura 85. Coral em contexto real simulado.

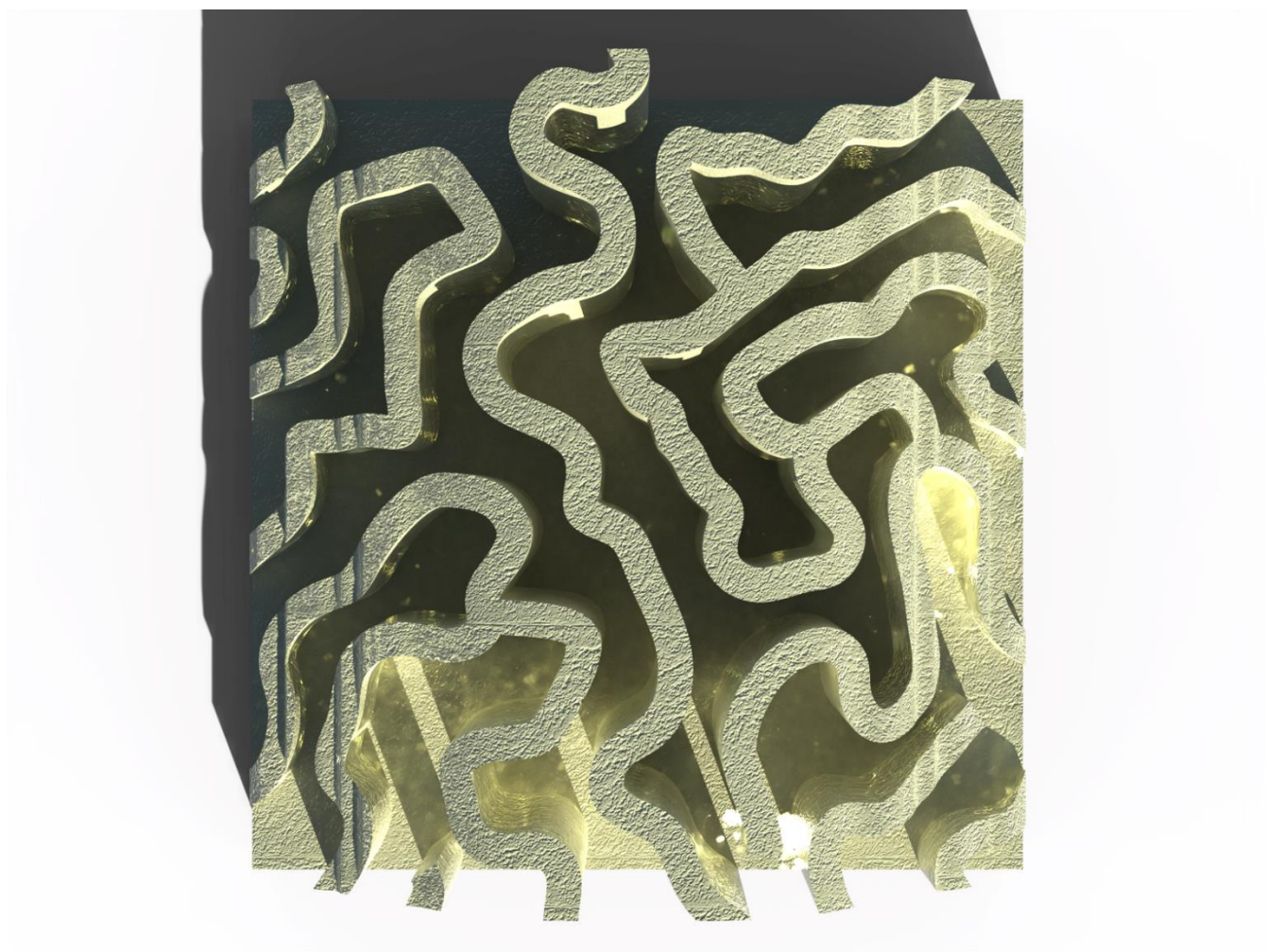
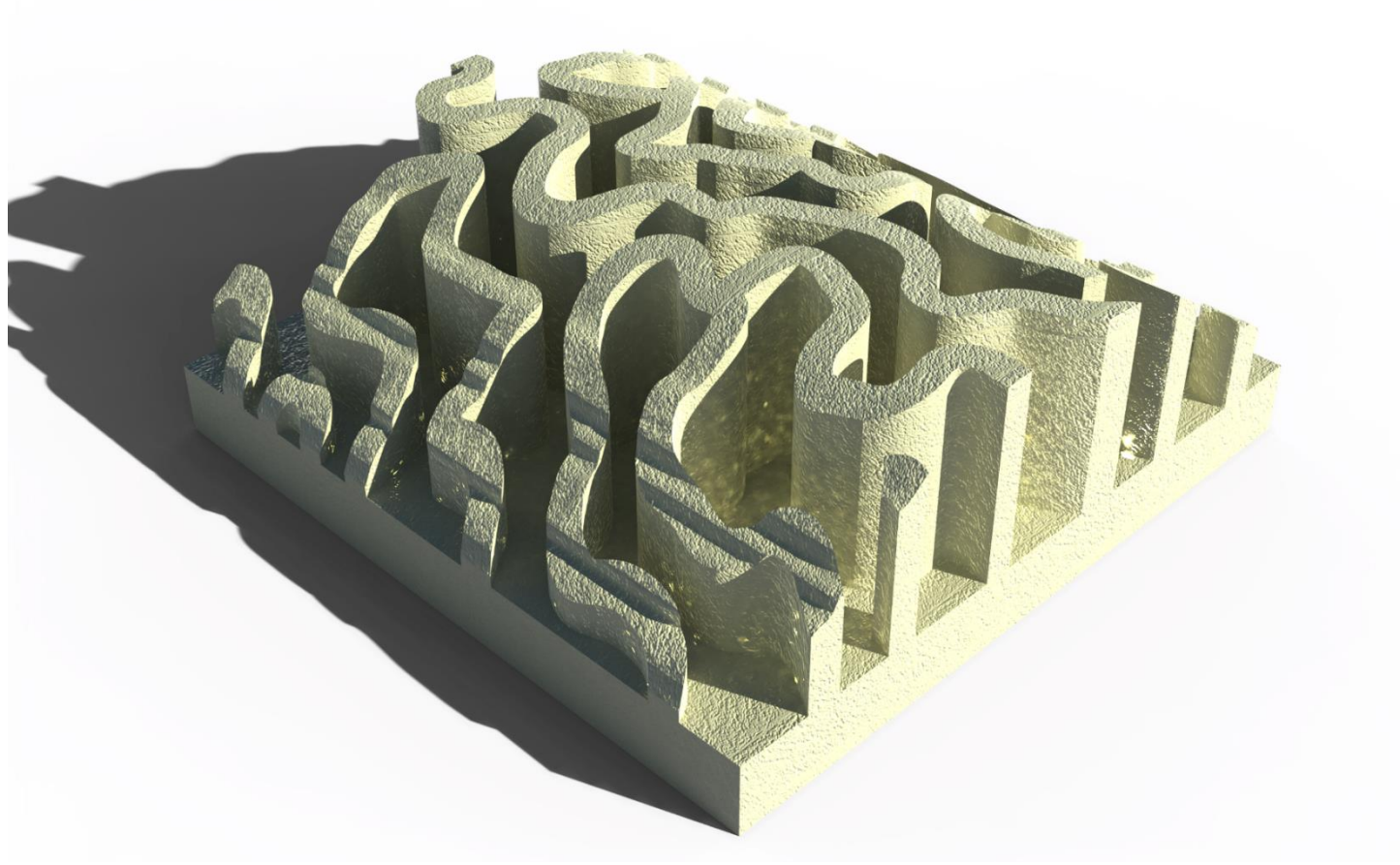


Figura 86. Vista realista do módulo 1 do produto.

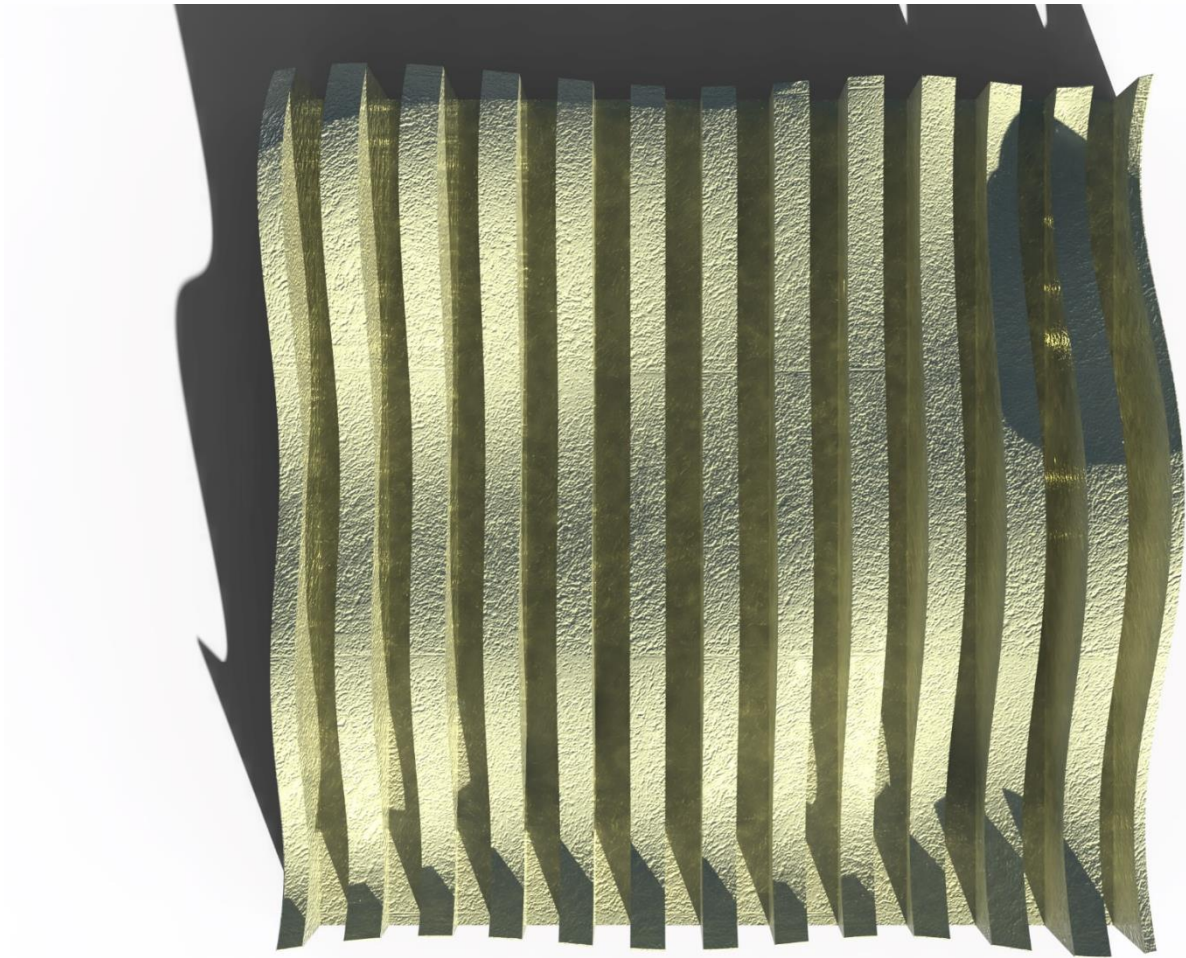
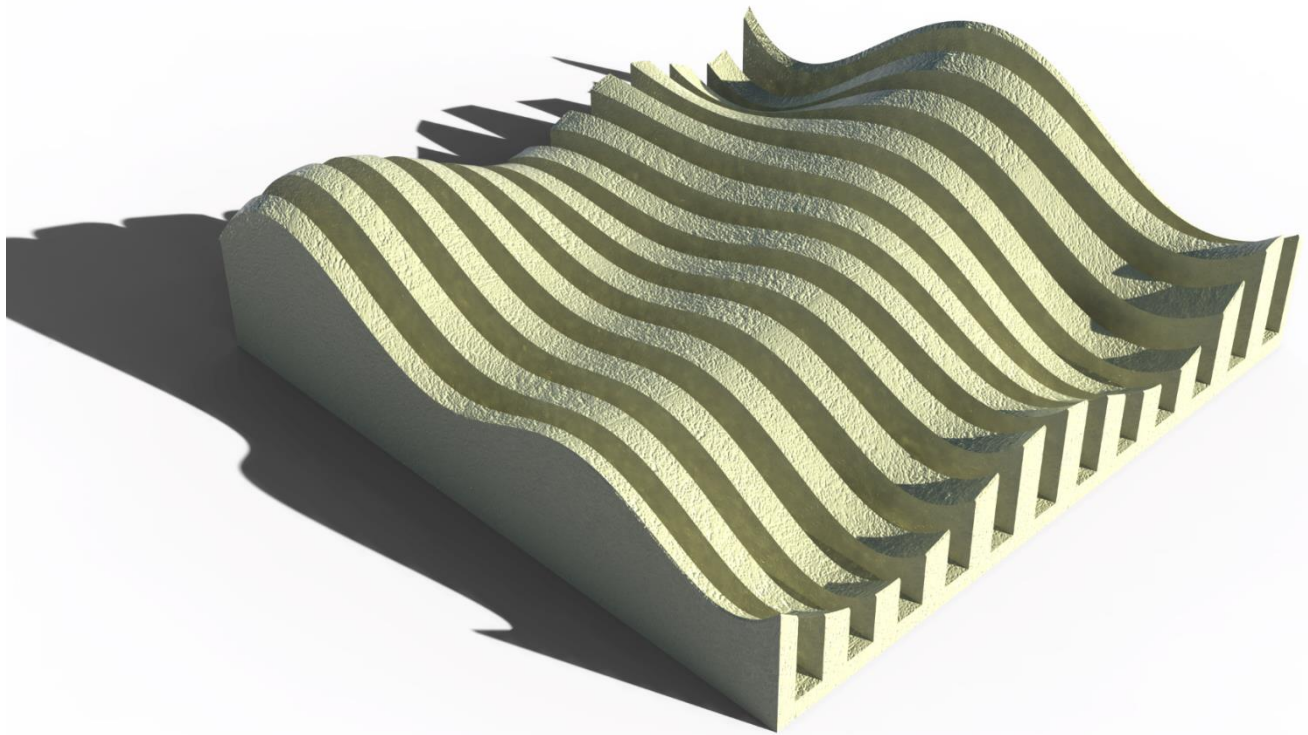


Figura 87. Vista realista do módulo 2 do produto.

Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

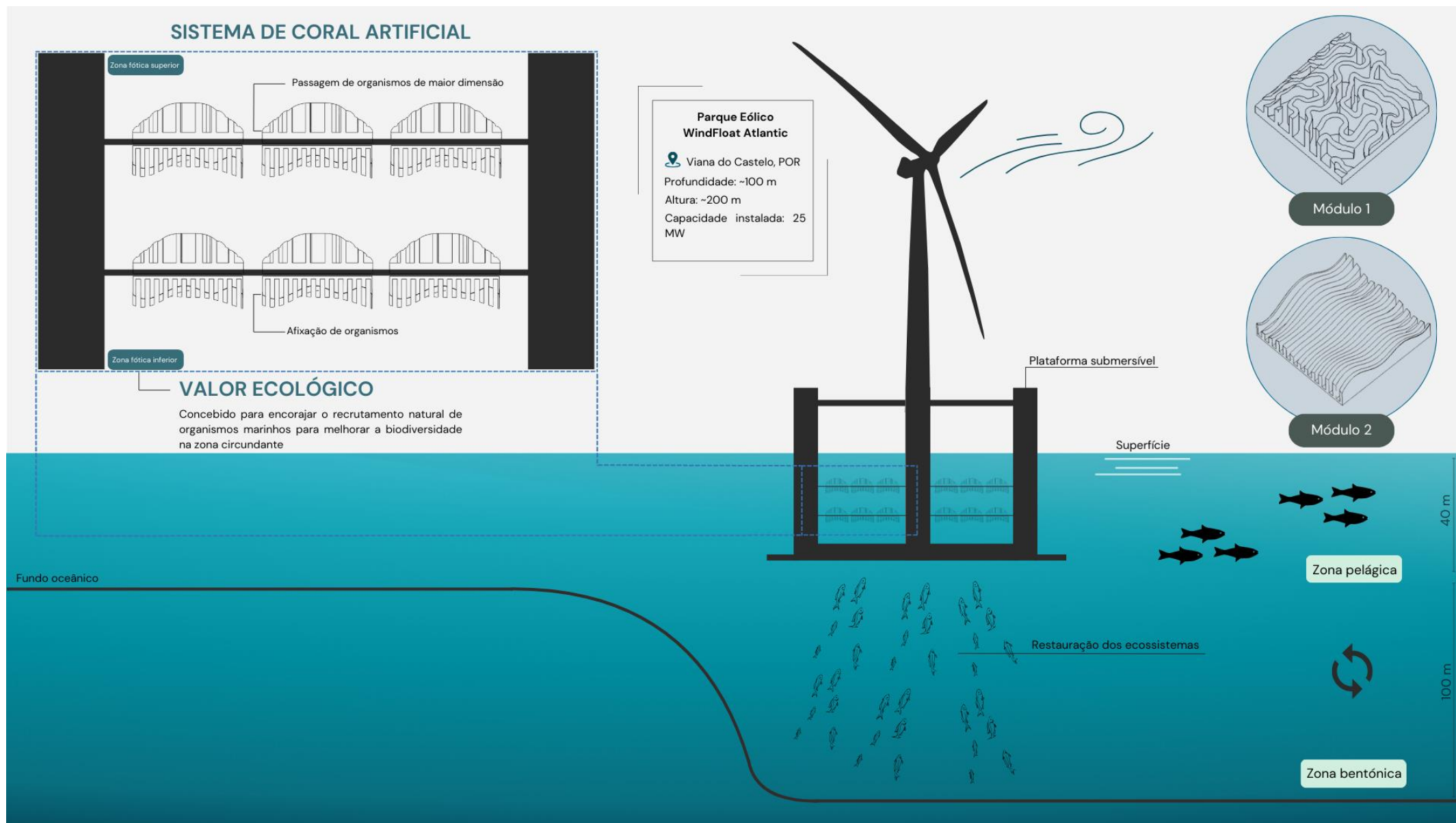


Figura 88. Visão geral da implementação do conceito e valorização ecológica.

CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES

4.1 Conclusão

Neste estudo foi demonstrada a capacidade das tecnologias de manufatura aditiva, nomeadamente impressão 3D, para a criação de CA. Validou-se a criação de morfologias complexas e incorporação de relevos, garantindo-se um método construtivo adequado para a área da ecologia marinha, permitindo criar protótipos rápidos e de baixo custo.

Os resultados do procedimento experimental foram conclusivos e revelaram a viabilidade da utilização da concha de mexilhão como principal agregado para a criação de argamassas sustentáveis. Após a conclusão dos dois momentos do plano experimental, relativos à extrusão manual e na impressora respetivamente, validou-se uma mistura (M.13) de argamassa constituída por concha de mexilhão, cimento, metacaulino, água e superplastificante. A amostra revelou apresentar indícios de qualidade para a impressão 3D, tendo apresentado parâmetros de “printability” considerados ótimos. Estes confirmaram-se com a impressão de camadas estáveis e sem deformação, com uma capacidade de construção e qualidade visual ótimas.

O procedimento permitiu ainda validar, para o bocal da impressora utilizado (12mm), a utilização de concha sem granulometria efetiva, que permitiu a obtenção das amostras de melhor qualidade, nomeadamente em M.12 e M.13. Além disso, a incorporação de resíduos de exploração alimentar da concha promoveu a economia circular, através do reaproveitamento do material.

A impressão do protótipo do coral colocou certas questões no *design* da peça, onde foram identificadas algumas não conformidades, que no final acabaram por retirar qualidade à peça. Foram identificadas falhas em pontos críticos da estrutura, nomeadamente em zonas de interrupção de filamento, culminando em acabamentos imperfeitos nessas zonas. No entanto, retiraram-se ilações para que, em trabalhos futuros, se possam retificar essas mesmas inconformidades.

Em suma, existiu uma validação do estudo do material, bem como um desenvolvimento concetual em concordância como solução para mitigar consequências ambientais sentidas em zonas de implementação de eólicas flutuantes *offshore*. Além disso, houve uma exploração de técnicas convencionais e contemporâneas de manufatura aditiva como ferramenta para a validação do projeto.

4.2 Trabalhos futuros

Em todos os projetos realizados torna-se fundamental, antes de preconizar trabalhos futuros, analisar os resultados alcançados e perspetivar novos métodos de melhoria para o mesmo. O processo experimental revelou resultados promissores na introdução de agregados naturais como a concha de mexilhão em argamassas para a extrusão via impressão 3D, validando por isso o estudo do material. A impressão do protótipo, por outro lado, revelou resultados menos conseguidos, fruto de uma inconsistência entre o *design* da peça e as características da impressão.

Dessa forma, existe uma vontade em continuar o trabalho efetuado, de forma a expandir o método experimental e abranger novas combinações de material capazes de demonstrar resultados distintos, mas igualmente promissores. Além disso, é necessário que haja uma reavaliação do processo criativo de forma a encontrar um *design* em maior concordância com o processo de manufatura aditiva estabelecido.

Em termos de trabalhos futuros, preconiza-se a impressão 3D do coral à escala real, recorrendo a impressoras de maiores dimensões. Com isso, será possível validar a escalabilidade construtiva da peça. De forma complementar, pretende-se realizar métodos de implementação do coral no oceano. Com isto, será possível depreender, numa primeira fase, índices de atratividade com as espécies locais e ainda o comportamento estrutural do material previamente validado.

Posteriormente, e após validação dos parâmetros indicados, pretende-se viabilizar o conceito desenvolvido, e introduzir o coral na plataforma flutuante *WindFloat*. É importante clarificar que, para isto acontecer, é necessário que haja uma reavaliação estrutural da plataforma em concordância com o peso e dimensão do/dos coral/corais.

A metodologia sistemática desenvolvida pode ser replicada, testada e validada com outras plataformas flutuantes do mercado, havendo necessidade de um reajuste de acordo com a tipologia abordada. O objetivo primordial passará por implementar um programa experimental em investigações futuras, para que se possam analisar os comportamentos biológicos quer da estrutura, quer do ecossistema. Além disto, perceber a contribuição destes comportamentos para a mitigação dos impactos das estruturas *offshore* flutuantes.

Referências Bibliográficas

- 3D Bonum. (2020). *WASP Printers*. Recolhido a 12 de Dezembro, 2023, de: <https://3dbonum.com/products/wasp-printers/>
- Aaron Du. (2021). *Semi-Submersible, Spar and TLP – How to select floating wind foundation types?* Recolhido a 2 de Outubro, 2023, de: <https://www.empireengineering.co.uk/semi-submersible-spar-and-tlp-floating-wind-foundations/>
- Australian Marine Conservation Society. (n.d.). *The impact of ghost nets on ocean wildlife*.
- AW Ramm, L., Florisson, J. H., Watts, S. L., Becker, A., & Tweedley, J. R. (2021). Artificial reefs in the Anthropocene: A review of geographical and historical trends in their design, purpose, and monitoring. *Bulletin of Marine Science*, 97(4), 699–728. <https://doi.org/10.5343/bms.2020.0046>
- Barooni, M., Ashuri, T., Velioglu Sogut, D., Wood, S., & Ghaderpour Taleghani, S. (2023). Floating Offshore Wind Turbines: Current Status and Future Prospects. In *Energies* (Vol. 16, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16010002>
- Bellwood, D. R., & Hughes, T. P. (2001). *Regional-scale assembly rules and biodiversity of coral reefs*.
- Bentley Expert. (2022, August 20). *All About Offshore Wind Turbine Foundations*.
- Beyer, F., Choisnet, T., Kretschmer, M., & Cheng, P. W. (2015). *Coupled MBS-CFD simulation of the IDEOL floating offshore wind turbine foundation compared to wave tank model test data*. 2015, 367–374.
- Blanco, E., Pedersen Zari, M., Raskin, K., & Clergeau, P. (2021). Urban Ecosystem-Level Biomimicry and Regenerative Design: Linking Ecosystem Functioning and Urban Built Environments. *Sustainability*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010404>
- Boukhelf, F., Sebaibi, N., Boutouil, M., Yoris-Nobile, A. I., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., Real-Gutierrez, C., Herbert, R. J. H., Greenhill, S., Reis, B., Franco, J. N., Borges, M. T., Sousa-Pinto, I., van der Linden, P., Gómez, O. B., Meyer, H. S., Almada, E., Stafford, R., Danet, V., ... E. Hall, A. (2022). On the Properties Evolution of Eco-Material Dedicated to Manufacturing Artificial Reef via 3D Printing: Long-Term Interactions of Cementitious Materials in the Marine Environment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159353>
- Bournemouth University. (2019). *3DPARE (3D Printing Artificial Reefs in the Atlantic)*.
- Caddy, J. F., & Stamatopoulos, C. (1990). Mapping growth and mortality rates of crevice-dwelling organisms onto a perforated surface: The relevance of ‘cover’ to the carrying capacity of natural and artificial habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31(1), 87–106. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-7714\(90\)90030-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-7714(90)90030-U)
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III*

- to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haïtes, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.).*
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Casey, J. M., Connolly, S. R., & Ainsworth, T. D. (2015). Coral transplantation triggers shift in microbiome and promotion of coral disease associated potential pathogens. *Scientific Reports*, 5(1), 11903. <https://doi.org/10.1038/srep11903>
- Castro-Santos, L., Silva, D., Bento, A. R., Salvação, N., & Guedes Soares, C. (2020). Economic feasibility of floating offshore wind farms in Portugal. *Ocean Engineering*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107393>
- Chandran, R. (2021). *Defining Heritage and Cultural Preservation through Design: A Framework for Experience Design Redefining Heritage and Cultural Preservation through Design: A Framework for Experience Design*. <https://www.researchgate.net/publication/356457422>
- Chitteth Ramachandran, R., Desmond, C., Judge, F., Serraris, J. J., & Murphy, J. (2022). Floating wind turbines: marine operations challenges and opportunities. In *Wind Energy Science* (Vol. 7, Issue 2, pp. 903–924). Copernicus Publications. <https://doi.org/10.5194/wes-7-903-2022>
- Chou, M. , L. (1997). *Artificial Reefs of Southeast Asia- Do They Enhance Or Degrade the Marine Environment*.
- Cimpor. (2023). *FICHA TÉCNICA CEM I 42,5 R*. Recolhido a 12 de Agosto, 2024, de: www.cimpor.com
- Cleyde Mabota. (2023). *IMPRESSÃO 3D NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CLEYDE LETÍCIA CASIMIRO MABOTA Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS*.
<http://www.fe.up.pt>
- Coral Nurture Program. (2024). *Boosting resilience at high-value reef sites For The Great Barrier Reef*. Recolhido a 3 de Novembro, 2023, de: <https://www.coralnurtureprogram.org/>
- Cosgrove, C. (2016). *Artificial Reef Construction in the Arabian Gulf*.
- De Castro, J. B., De Oliveira, J. B., Toledo, L. G., Martins, Á. J. A. L., Elisa, M., Silva, S. R. E., Freitas, R. F. S., & De Sousa, R. G. (n.d.). *AVALIAÇÃO DA HIDROFOBICIDADE DE MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS EM LINHAS DE ALTA TENSÃO*.
- Dodds, K. C., Schaefer, N., Bishop, M. J., Nakagawa, S., Brooks, P. R., Knights, A. M., & Strain, E. M. A. (2022). Material type influences the abundance but not richness of colonising organisms on marine structures. *Journal of Environmental Management*, 307, 114549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114549>
- Eddy, T. D., Lam, V. W. Y., Reygondeau, G., Cisneros-Montemayor, A. M., Greer, K., Palomares, M. L. D., Bruno, J. F., Ota, Y., & Cheung, W. W. L. (2021). Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*, 4(9), 1278–1285. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.016>

- Eduardo Souza. (2020). *Rethinking Artificial Reef Structures through 3D Clay Printing*. Recolhido a 30 de Outubro, 2023, de: <https://www.archdaily.com/947495/rethinking-artificial-reef-structures-through-3d-clay-printing>
- el Biriane, M., & Barbachì, M. (2020). Properties of Sustainable Concrete with Mussel Shell Waste Powder. *The Open Civil Engineering Journal*, 14, 350–364.
<https://doi.org/10.2174/1874149502014010350>
- Fabi, G., Spagnolo, A., Bellan-Santini, D., Charbonnel, E., Çiçek, B. A., García, J. J. G., Jensen, A. C., Kallianiotis, A., & dos Santos, M. N. (2011). Overview on artificial reefs in Europe. *Brazilian Journal of Oceanography*, 59(SPEC. ISSUE 1), 155–166.
<https://doi.org/10.1590/s1679-87592011000500017>
- Fazeres-Ferradosa, T., Taveira-Pinto, F., Romão, X., Vanem, E., Reis, M. T., & das Neves, L. (2018). Probabilistic design and reliability analysis of scour protections for offshore windfarms. *Engineering Failure Analysis*, 91, 291–305.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.035>
- Ferreira, C., Gonçalves, J., & Coutinho, R. (2001). Community Structure of Fishes and Habitat Complexity on a Tropical Rocky Shore. *Environmental Biology of Fishes*, 61, 353–369.
<https://doi.org/10.1023/A:1011609617330>
- Firth, L. B., Farnworth, M., Fraser, K. P. P., & McQuatters-Gollop, A. (2023). Make a difference: Choose artificial reefs over natural reefs to compensate for the environmental impacts of dive tourism. *Science of The Total Environment*, 901, 165488.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165488>
- Florisson, J., Rowland, A., Matthews, A., Tweedley, J., & Campbell, L. (2018). *Habitat Enhancement Structures in Western Australia The applications, needs, costs, benefits and cost-effective monitoring methods*.
- Fonseca, M., & Matos, A. M. (2023). 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities. In *Materials* (Vol. 16, Issue 6). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/ma16062458>
- Goad Alex. (2023). *The Future of Coastal Preservation: Reef Design Lab's EMU*.
- Godec, D., Pilipović, A., Breški, T., Ureña, J., Jordá, O., Martínez, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Schuschnigg, S., Blasco, J. R., & Portolés, L. (2022). Introduction to Additive Manufacturing. In D. Godec, J. Gonzalez-Gutierrez, A. Nordin, E. Pei, & J. Ureña Alcázar (Eds.), *A Guide to Additive Manufacturing* (pp. 1–44). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9_1
- Hamner, W. M., & Wolanski, E. (1988). *Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence*.
- Han, C., Liu, K., Kinoshita, T., Guo, B., Zhao, Y., Ye, Y., Liu, Y., Yamashita, O., Zheng, D., Wang, W., & Lu, X. (2023). Assessing the Attractive Effects of Floating Artificial Reefs and Combination Reefs on Six Local Marine Species. *Fishes*, 8(5).
<https://doi.org/10.3390/fishes8050248>
- heal the planet. (n.d.). *Ghost Fishing Gear*. Recolhido a 18 de Agosto, 2024, de: <https://healtheplanet.com/100-ways-to-heal-the-planet/ghost-fishing-gear>

- International Renewable Energy Agency, T. (2024). *Floating offshore wind outlook*.
www.irena.org
- Interreg. (2021). *3DPARE Artificial reef 3D printing for Atlantic area*. Recolhido a 23 de Outubro, 2023, de: <https://www.giteco.unican.es/proyectos/3dpare/index.html>
- Jiang, Y., Hu, G., Zong, Z., Zou, li, & Guoqing, J. (2020). Influence of an Integral Heave Plate on the Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine Under Operational and Storm Conditions. *Energies*, 13, 6122. <https://doi.org/10.3390/en13226122>
- Jiang, Z., Liang, Z., & Zhu, L. (2020). *Effect of hole diameter of rotary-shaped artificial reef on flow field*.
- Jiang, Z., Liang, Z., Zhu, L., Guo, Z., & Tang, Y. (2020). Effect of hole diameter of rotary-shaped artificial reef on flow field. *Ocean Engineering*, 197.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106917>
- João Teixeira, Bárbara Rangel, Cecília Ogliari Schaefer, Lino Maia, & Jorge Lino Alves. (2022). *A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction e The state of art*.
- Juliano Silva Lima, & Ilana Rosental Zalmon. (2020). Modern Fisheries Engineering. In *Modern Fisheries Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429328039>
- Kershaw Francine, & Loomis Rebecca. (2021). *Floating Offshore Wind Brings Challenges and Opportunities*.
- Kreider, M., Oteri, F., Robertson, A., Constant, C., & Gill, E. (2021). *Offshore Wind Energy: Technology Below the Water*. <https://windexchange.energy.gov>
- Ladd, M. C., & Shantz, A. A. (2020). Trophic interactions in coral reef restoration: A review. *Food Webs*, 24, e00149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2020.e00149>
- Lawson Liberty. (2018). *The Octopus's Gardener: Growing Coral Reefs in the Gili Islands*.
- Lee, Y., & Bhat, S. (2024). *You're working on a CAD design for 3D printing. What should you consider to optimize it?* Recolhido a 21 de Março, 2024, de:
<https://www.linkedin.com/advice/1/youre-working-cad-design-3d-printing-359ue>
- Leimeister, M., Kolios, A., & Collu, M. (2018). Critical review of floating support structures for offshore wind farm deployment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1104(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012007>
- Lemoine, H. R., Paxton, A. B., & Anisfeld, S. C. (2019). *Selecting the optimal artificial reefs to achieve fish habitat enhancement*.
- Leonard, C., Hédouin, L., Lacorne, M. C., Dalle, J., Lapinski, M., Blanc, P., & Nugues, M. M. (2022). Performance of innovative materials as recruitment substrates for coral restoration. *Restoration Ecology*, 30(7), e13625.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/rec.13625>
- Levy, N., Berman, O., Yuval, M., Loya, Y., Treibitz, T., Tarazi, E., & Levy, O. (2022). Emerging 3D technologies for future reformation of coral reefs: Enhancing biodiversity using biomimetic structures based on designs by nature. *Science of The Total Environment*, 830, 154749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154749>

Limpo, J. (n.d.). *Assessment of Offshore Wind Energy Lisbon*.

Luo, D., Wang, B., Bao, D. W., & Ward, S. (2022a). Opportunities for further development of 3D-printed floating artificial reefs. *Journal of Aquaculture and Marine Biology*, 11(1), 58–63. <https://doi.org/10.15406/jamb.2022.11.00337>

Luo, D., Wang, B., Bao, D. W., & Ward, S. (2022b). Opportunities for further development of 3D-printed floating artificial reefs. *Journal of Aquaculture and Marine Biology*, 11(1), 58–63. <https://doi.org/10.15406/jamb.2022.11.00337>

Ma, G., Wang, L., & Ju, Y. (2017). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>

Madhuwanthi Rupasinghe, Rackel San Nicolas, Brendan S. Lanham, & Rebecca L. Morris. (2023). *Sustainable oyster shell incorporated artificial reef concrete for living shorelines*.

Maktabi, M., & Rusu, E. (2024). A Review of Perspectives on Developing Floating Wind Farms. *Inventions*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/inventions9020024>

Mang, P., & Reed, B. (2012). Regenerative Development and Design. *Encyclopedia Sustainability Science & Technology*, 1, 8855. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5828-9_303

Marcus Adam, Ikeda Margaret, & Jones Evan. (2019). *Buoyant Ecologies Float Lab*.

Mat Jusoh, Z., Kasim, N., Ibrahim, M., Sarpin, N., Noh, H., & Zainal, R. (2018). Influential Factors for Effective Materials Management in Construction Projects. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 9. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2018.09.02.005>

Matus, I. (2020). *Estudo da aplicação da impressão 3D na produção de substratos que fomentam a propagação de corais*.

Matus, I. V., Lino Alves, J., Góis, J., Barata da Rocha, A., Neto, R., & Da Silva Mota, C. (2021). Effect of 3D printer enabled surface morphology and composition on coral growth in artificial reefs. *Rapid Prototyping Journal*, 27(4), 692–706. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0165>

Mcleod, E., Anthony, K. R. N., Mumby, P. J., Maynard, J., Beeden, R., Graham, N. A. J., Heron, S. F., Hoegh-Guldberg, O., Jupiter, S., MacGowan, P., Mangubhai, S., Marshall, N., Marshall, P. A., McClanahan, T. R., Mcleod, K., Nyström, M., Obura, D., Parker, B., Possingham, H. P., ... Tamelander, J. (2019). The future of resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 233, 291–301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>

Morais, R. A., & Bellwood, D. R. (2019). Pelagic Subsidies Underpin Fish Productivity on a Degraded Coral Reef. *Current Biology*, 29(9), 1521-1527.e6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.044>

Muliawati, N., Setiadi, I. M. D., Verma, G., Wardani, M., & Otivriyanti, G. (2022). Artificial Coral Reef Growth Media Model Engineering from Ceramic. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 348). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234800033>

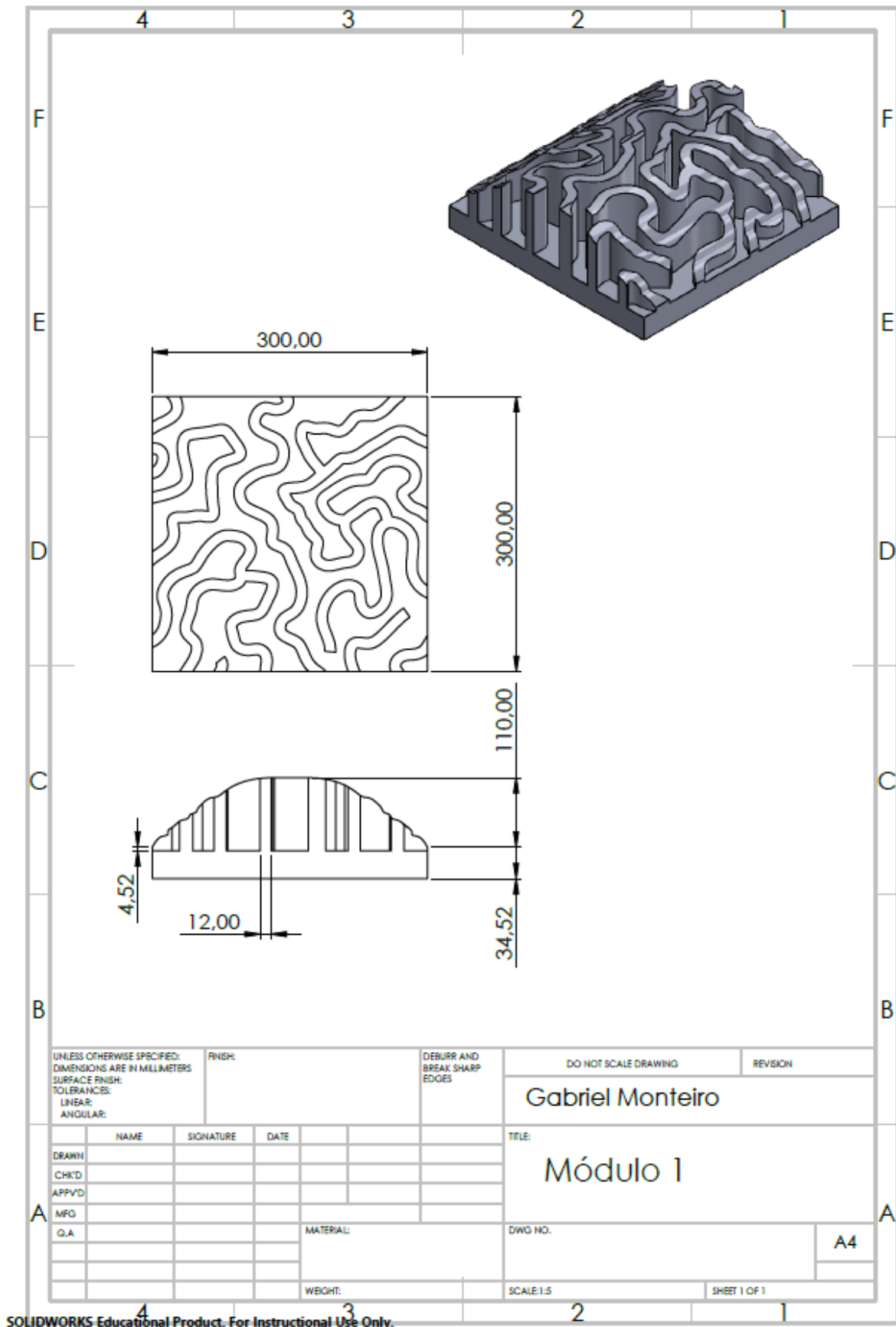
- Musial, W., Spitsen, P., Duffy, P., Beiter, P., Marquis, M., Hammond, R., & Shields, M. (2022). *Offshore Wind Market Report: 2022 Edition*.
- NOAA. (2024). *What is coral bleaching?* https://oceanservice.noaa.gov/facts/coral_bleach.html
- Onea, F., & Rusu, E. (2022). An Evaluation of Marine Renewable Energy Resources Complementarity in the Portuguese Nearshore. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/jmse10121901>
- O'Reilly, L. M., & Willerth, S. M. (2023). Evaluating the biocompatibility of ceramic materials for constructing artificial reefs. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1292584>
- Ørsted, & WWF. (2022). *Can 3D-printed reefs benefit biodiversity?* Recolhido a 19 de Dezembro, 2023, de: <https://orsted.com/en/who-we-are/sustainability/nature/net-positive-biodiversity-impact/3d-printed-reefs-biodiversity-restoration>
- Parker, J., & Burkepile, D. (2006). *Opposing effects of native and exotic herbivores on plant invasions*.
- Pedersen Zari, M., & Hecht, K. (2020). Biomimicry for Regenerative Built Environments: Mapping Design Strategies for Producing Ecosystem Services. *Biomimetics*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/biomimetics5020018>
- Perricone, V., Mutalipassi, M., Mele, A., Buono, M., Vicinanza, D., & Contestabile, P. (2023). Nature-based and bioinspired solutions for coastal protection: an overview among key ecosystems and a promising pathway for new functional and sustainable designs. *ICES Journal of Marine Science*, 80. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad080>
- Pure Ocean. (2022). *Floating Reef An ecological mooring buoy to keep posidonia meadows and biodiversity afloat*. Recolhido a 3 de Janeiro, 2024, de: <https://www.pure-ocean.org/en/our-projects/floating-reef/>
- Reef Arabia. (2012). *Bahrain - Artificial Reef Project (2012)*. Recolhido a 29 de Dezembro, 2023, de: <https://reefarabia.com/our-projects/bahrain-artificial-reef-program/>
- Reef Design Lab. (2019). *MARS MODULAR ARTIFICIAL REEF STRUCTURE*. Recolhido a 10 de Outubro, 2023, de: <https://www.reefdesignlab.com/mars>
- Reef Design Lab. (2023). *EMU EROSION MITIGATION UNITS*. Recolhido a 13 de Outubro, 2023, de: <https://www.reefdesignlab.com/emu>
- Reef Design Lab, & Sydney institute of marine science. (2024). *Living Seawalls*.
- Rehman, A. U., & Kim, J. H. (2021). 3d concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. In *Materials* (Vol. 14, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14143800>
- Rezaei, F., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Azzellino, A. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. In *Ocean and Coastal Management* (Vol. 243). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106772>
- Richardson, K., Hardesty, B., Vince, J., & Wilcox, C. (2022). *Global estimates of fishing gear lost to the ocean each year*.

- Riera, E., Mauroy, B., Francour, P., Hubas, C., & Elisabeth Riera, C. (n.d.). *Unleashing The Potential Of Artificial Reefs Design: A Purpose-Driven Evaluation Of Structural Complexity*.
- Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Weinstein, A. (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2. <https://doi.org/10.1063/1.3435339>
- Rogers, A., Blanchard, J. L., & Mumby, P. J. (2014). Vulnerability of Coral Reef Fisheries to a Loss of Structural Complexity. *Current Biology*, 24(9), 1000–1005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.026>
- Sandin, S., Smith, J., DeMartini, E., Dinsdale, E., Donner, S., Friedlander, A., Konotchick, T., Malay, M. C. (Machel), Maragos, J., Obura, D., Pantos, O., Paulay, G., Richie, M., Rohwer, F., Schroeder, R., Walsh, S., Jackson, J., Knowlton, N., & Sala, E. (2008). Baselines and Degradation of Coral Reefs in the Northern Line Islands. *PloS One*, 3, e1548. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001548>
- Silliman, B. R., Schrack, E., He, Q., Cope, R., Santoni, A., van der Heide, T., Jacobi, R., Jacobi, M., & van de Koppel, J. (2015). Facilitation shifts paradigms and can amplify coastal restoration efforts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(46), 14295–14300. <https://doi.org/10.1073/pnas.1515297112>
- Silva Lima, J., Zalmon, I., & Love, M. (2019). Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs. *Marine Environmental Research*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.01.010>
- Skaare, B., Nielsen, F., Hanson, T., Yttervik, R., Havmøller, O., & Rekdal, A. (2014). Analysis of measurements and simulations from the Hywind Demo floating wind turbine: Dynamic analysis of the Hywind Demo floating wind turbine. *Wind Energy*, 18. <https://doi.org/10.1002/we.1750>
- Soares, C. Guedes. (2019). *Advances in renewable energies offshore: proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018), 8-10 October 2018, Lisbon, Portugal*. CRC Press/Balkema.
- Soares, M. (2008). *Biomimetismo e Ecodesign: Desenvolvimento de uma ferramenta criativa de apoio ao design de produtos sustentáveis*.
- Souter, D., Planes, S., Wicquart, J., Logan, M., Obura, D., & Staub, F. (2020). *Status of Coral Reefs of the World: 2020 Summary for Policymakers Summary for Policymakers-Status of Coral Reefs of the World: 2020 Value of coral reefs*. <https://gcrmn.net/wp-content/uploads/2022/05/Status-of-Coral-Reefs-of-the-World-2020-Summary-for-Policymakers.pdf>
- Teixeira, J. (2018). Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios.
- UN. (2023). *Fishing nets: the double-edged plastic swords in our ocean*. Recolhido a 27 de Junho, 2024, de: <https://www.unep.org/technical-highlight/fishing-nets-double-edged-plastic-swords-our-ocean>
- Valenzuela Matus, I., Góis, J., Vaz-Pires, P., & Lino Alves, J. (2024). Coral Propagation in Substrates Obtained Through Additive Manufacturing: Influence of Mortar Formulations

- on Seawater Parameters. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01276>
- Valeriya Komyakova, Brigitte Wright, Stewart Frusher, Saeed Mohajernasab, Ali Shakourloo, Nagi Abdussamie, & Marcus Haward. (2022). Final project report identifying the potential of artificial floating benthic ecosystems to underpin offshore development.
- Vieira, M., Henriques, E., Amaral, M., Arantes-Oliveira, N., & Reis, L. (2019). Path discussion for offshore wind in Portugal up to 2030. *Marine Policy*, 100, 122–131.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.021>
- VoxelMatters. (2024). *Liquid Deposition Modeling (LDM)*. Recolhido a 16 de Abril, 2024, de:
<https://www.voxelmatters.com/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-liquid-deposition-modeling/>
- Wind Europe. (2022). *Wind energy in Europe*. Recolhido a 4 de Novembro, 2023, de:
<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2022-statistics-and-the-outlook-for-2023-2027/>
- WindEurope. (2024). *Wind Power Numbers Daily*. Recolhido a 20 de Janeiro, 2024, de:
<https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/>
- WindFloat®. (2024). *The WindFloat® advantage*. Recolhido a 27 de Fevereiro, 2024, de:
<https://www.principlepower.com/windfloat/the-windfloat-advantage>
- WMO. (2023). *State of the Global Climate 2023*.
- Xu, Q., Ji, T., Yang, Z., & Ye, Y. (2019). Preliminary investigation of artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, marine sand and sea water. *Construction and Building Materials*, 211, 837–846.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.272>
- Yalcinkaya Gunseli. (2019). *Volvo creates Living Seawall to combat pollution and promote biodiversity*. Recolhido a 11 de Dezembro, 2023, de:
<https://www.dezeen.com/2019/01/31/volvo-living-seawall-pollution-biodiversity-design/>
- Yoris-Nobile, A. I., Slebi-Acevedo, C. J., Lizasoain-Arteaga, E., Indacoechea-Vega, I., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., Alonso-Estebanez, A., Alonso-Cañon, S., Real-Gutierrez, C., Boukhelf, F., Boutouil, M., Sebaibi, N., Hall, A., Greenhill, S., Herbert, R., Stafford, R., Reis, B., van der Linden, P., Gómez, O. B., ... Lobo-Arteaga, J. (2023). Artificial reefs built by 3D printing: Systematisation in the design, material selection and fabrication. *Construction and Building Materials*, 362.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129766>

Anexos

Anexo A – Desenhos Técnicos



Impressão 3D de um Coral Artificial

O Design como Veículo para a Otimização Biológica de Plataformas Eólicas Flutuantes

