

BIOCOMPATIBILIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS EM AMBIENTE MARINHO SIMULADO

KALLEY CAVALCANTE SANTOS DA ROCHA¹, EDUARDO DA CRUZ TEXEIRA², CAMILA MECEDO MEDEIROS³ e ISYANNE TAVARES DA SILVA SOBRAL⁴

¹Graduando em Construção de Edifícios, IFPB, Campina Grande - PB, kalley.cavalcante@academico.ifpb.edu.br;

²Doutor em Eng. De Materiais, IFPB, Campina Grande - PB, eduardo.teixeira@ifpb.edu.br;

³Mestra em Eng. Civil e Ambiental, IFPB, Campina Grande - PB, camila.medeiros@ifpb.edu.br;

⁴Graduanda em Construção de Edifícios, IFPB, Campina Grande - PB, isyanne.tavares@academico.ifpb.edu.br;

RESUMO: O crescimento das atividades humanas em ambientes marinhos intensificou a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis para infraestruturas costeiras e subaquáticas. Materiais convencionais, como o concreto à base de cimento Portland, contribuem significativamente para as emissões de CO₂ e impactaram negativamente a biodiversidade local. Nesse contexto, a biocompatibilidade e a bioreceptividade de materiais cimentícios tornaram-se critérios essenciais para o desenvolvimento de estruturas que suportem condições severas e favoreçam novos habitats. Esta pesquisa avaliou a biocompatibilidade de argamassas sustentáveis em ambiente marinho simulado por até seis meses, investigando suas propriedades e a formação de biofilmes. As argamassas foram formuladas com substituição parcial do cimento por metacaolim e filer calcário, além do uso de areia marinha e de concha como agregados alternativos. Os corpos de prova foram fabricados por manufatura aditiva. Os resultados indicaram maior bioreceptividade e desempenho ambiental favorável, promovendo a biodiversidade e a restauração ecológica. Constatou-se que a combinação entre materiais cimentícios sustentáveis e conceitos de biocompatibilidade representa uma alternativa promissora para infraestruturas marinhas mais eficientes, resilientes e integradas.

PALAVRAS-CHAVE: Bioreceptividade, Bioincrustação, Manufatura Aditiva, Infraestruturas Subaquáticas, Materiais Suplementares.

BIOCOMPATIBILITY OF CEMENTITIOUS MATERIALS IN A SIMULATED MARINE ENVIRONMENT

ABSTRACT: The growth of human activities in marine environments has intensified the need for innovative and sustainable solutions for coastal and underwater infrastructures. Conventional materials, such as Portland cement concrete, contribute significantly to CO₂ emissions and negatively impact local biodiversity. In this context, the biocompatibility and bioreceptivity of cementitious materials have become essential criteria for developing structures that withstand harsh conditions and favor new habitats. This research evaluated the biocompatibility of sustainable mortars in a simulated marine environment for up to six months, investigating their Properties and biofilm formation. The mortars were formulated with partial cement replacement by metakaolin and limestone filler, alongside the use of marine and shell sand as sustainable alternative aggregates. The specimens were fabricated via additive manufacturing. The results indicated higher bioreceptivity and favorable environmental performance, promoting biodiversity and contributing to ecological restoration. It was found that combining sustainable cementitious materials with biocompatibility concepts represents a promising alternative for developing more efficient, resilient, and integrated marine infrastructures.

KEYWORDS: Bioreceptivity, Biofouling, Additive Manufacturing, Underwater Infrastructures.

INTRODUÇÃO

O aumento das atividades nos oceanos impulsiona a busca por infraestruturas subaquáticas inovadoras e sustentáveis que substituam materiais tradicionais causadores de impactos negativos na biodiversidade (Browne & Chapman, 2011; Souche et al., 2019). Nesse cenário, a bioreceptividade surge como fator determinante para que as estruturas atraíam e suportem a fixação de organismos, favorecendo a sucessão ecológica e a criação de habitats (Guillitte, 1995; Berman, Weizman et al., 2023). Embora os materiais cimentícios tradicionais sejam amplamente utilizados, parâmetros como composição, rugosidade e pH influenciam diretamente essa colonização biológica, hoje vista como benéfica para a qualidade da água e suporte ecossistêmico (Manso et al., 2014b; Stohl et al., 2023). Além disso, a alta pegada de carbono do cimento Portland exige o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) para reduzir os danos ambientais (Ruviano et al., 2020; Cândido et al., 2022). Aliada a isso, a impressão 3D (manufatura aditiva) surge como estratégia promissora na produção de recifes artificiais complexos e customizados para uma melhor integração ecológica (Barbosa et al., 2022; Levy et al., 2022). Diante disso, este estudo objetiva analisar o comportamento físico-químico e a interação biológica de argamassas sustentáveis impressas em 3D em ambiente marinho simulado, visando estabelecer diretrizes para construções subaquáticas de baixo impacto.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAIS

A seleção dos materiais para os recifes artificiais priorizou a disponibilidade regional e a adequação ao ambiente marinho. Como ligantes, utilizaram-se o cimento Portland CP V-ARI, filer calcário (FC) e metacaulim (MK), cujas propriedades estão na Tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES;

Propriedade	Material	Norma	Valor
Diâmetro Médio da partícula (μm)	Cimento - CPV	-	8,04
	Metacaulim	-	11,69
	Fíler Calcário	-	27,71
Massa Específica (g/cm^3)	Cimento - CPV	ABNT NBR NM 23	3,13
	Metacaulim	ABNT NBR NM 23	2,88
	Fíler Calcário	ABNT NBR NM 23	2,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como agregados miúdos, adotou-se a areia de rio ($2,49 \text{ g}/\text{cm}^3$) como referência e duas alternativas marinhas: areia do mar ($2,6 \text{ g}/\text{cm}^3$) e areia de resíduos de conchas do molusco bivalve *Anomalocardia flexuosa* ($2,69 \text{ g}/\text{cm}^3$) (Bellei et al., 2023; da Silva Mourão et al., 2021). O processamento das conchas envolveu coleta, lavagem, secagem e britagem. Os ensaios aplicados constam na Tabela 2.

TABELA 2 – ENSAIOS REALIZADOS NOS AGREGADOS;

Propriedade	Norma
Granulometria	ABNT NBR 248
DRX	-
Massa específica	ABNT NBR NM 23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a dosagem das argamassas, utilizou-se água potável nos traços REF e R100, e água do mar nos demais. Foram adicionados aditivos superplastificante à base de policarboxilato (1%) e estabilizador de viscosidade HPMC (0,15%) sobre a massa de ligante.

TABELA 3 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS DAS ARGAMASSAS (KG/M³) PARA OS DIFERENTES TRAÇOS ESTUDADOS;

Traços	CPV (kg)	FC (kg)	MK (kg)	Areia (R) (kg)	Areia Concha (Sh)(kg)	Areia Mar (Se)(kg)	Água (kg)	a/c	SP (kg)	HPMC (kg)
REF (1:2,5)	593,99	0	0	1484,98	0	0	213,8	0,36	0	0
R100 (1:2,5)	223,46	231	69,54	1396,65	0	0	201,1	0,38	1,79	0,67
R50Sh50 (1:2,5)	223,46	231	69,54	698,32	755,15	0	255,4	0,49	2,84	0,67
R50Se50(1:2,5)	223,46	231	69,54	698,32	0	729,89	255,4	0,49	2,84	0,67
Sh50Se50(1:2,5)	223,46	231	69,54	0	755,15	729,89	268,2	0,51	2,84	0,67
Sh100(1:2,5)	223,46	231	69,54	0	1510,3	0	271,4	0,52	2,84	0,67
Se100(1:2,5)	223,46	231	69,54	0	0	1459,77	319,2	0,61	2,84	0,67
R33Se33Sh33(1:2,5)	223,46	231	69,54	465,55	503,43	486,59	255,4	0,49	2,84	0,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

MÉTODOS

Após o período de cura, corpos de prova cilíndricos foram submersos em aquários simulando o ambiente marinho por seis meses. A avaliação da bioincrustação — utilizada como indicador de biocompatibilidade — seguiu os métodos visual e de biomassa propostos por Ly et al. (2021) e Zelloufi et al. (2024). A metodologia consistiu em uma análise visual comparativa das amostras, seguida pela raspagem manual de toda a superfície com escova e água destilada para coletar os micros e macro-organismos aderidos. Por fim, a água contendo a biomassa foi filtrada em papéis de filtro de 25 mm, os quais foram submetidos à secagem a 105 °C para posterior pesagem (Ly et al., 2021; Zelloufi et al., 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise visual pós-exposição evidenciou variações significativas na quantidade e coloração do material retido nos papéis de filtro (Figura 1) e na superfície dos compósitos (Figura 3). Os traços R50Sh50, Sh50Se50 e R33Se33Sh33 exibiram coloração esverdeada intensa, associada a biofilmes fototróficos com microalgas e cianobactérias (Rossi & De Philippis, 2015; Miranda et al., 2017). Já o REF e o Se100 apresentaram coloração amarronzada e menor acúmulo biológico.

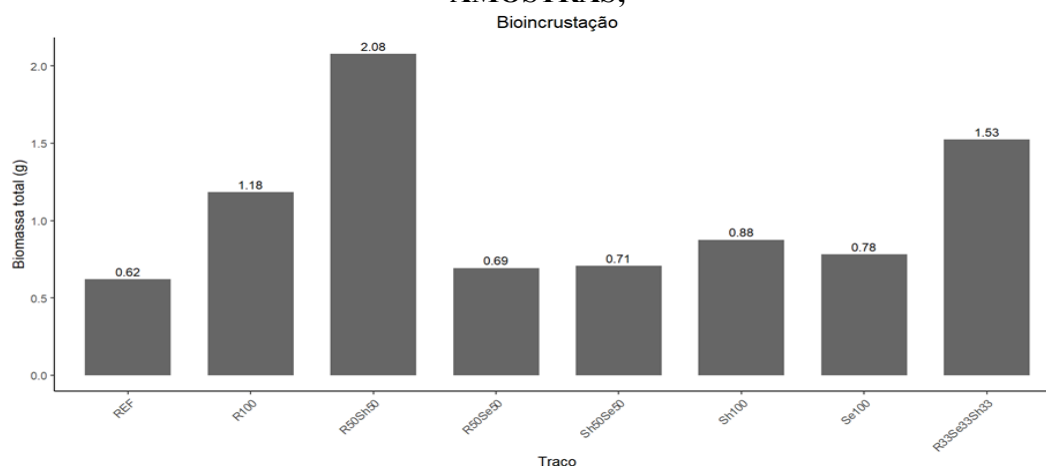
FIGURA 1 - FILTRO COM O MATERIAL BIOLÓGICO;



Fonte: Foto tirada pelo autor.

As diferenças visuais na coloração da biomassa retida nos filtros (Figura 1) indicam variações na composição das comunidades biológicas. Os traços R50Sh50, Sh50Se50 e R33Se33Sh33 exibiram uma coloração esverdeada intensa, sugerindo maior presença de biofilmes fototróficos ricos em microalgas e cianobactérias. Em contrapartida, as composições REF e Se100 apresentaram tons predominantemente amarronzados e menor densidade biológica. Essa coloração está diretamente associada à composição microbiana e à produção de pigmentos fotossintéticos, como clorofilas (Miranda et al., 2017; Rossi & De Philippis, 2015). De modo geral, os resultados evidenciam diferenças significativas na quantidade de organismos aderidos às superfícies das amostras, permitindo a comparação direta do desempenho de cada formulação quanto à sua capacidade de favorecer a colonização biológica.

FIGURA 2 - QUANTIDADE DE ORGANISMOS ADERIDOS ÀS SUPERFÍCIES DAS AMOSTRAS;



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após 6 meses, os traços R50Sh50 e R33Se33Sh33 tiveram maior acúmulo de biofilmes (coloração esverdeada/marrom), enquanto REF e Se100 registraram menor colonização. O traço R100 superou o REF em biomassa ($\approx 1,18$ g vs. $\approx 0,62$ g), demonstrando que materiais cimentícios suplementares reduzem a alcalinidade superficial e adaptam o substrato para a fixação microbiana inicial (Escudero et al., 2024; Hayek et al., 2023; Kobayashi et al., 2023), aproximando-o de ambientes costeiros naturais (Guo et al., 2021; Ly et al., 2021). O traço R50Sh50 apresentou a maior biocompatibilidade ($\approx 2,08$ g), impulsionado pelo carbonato de cálcio e pela rugosidade da areia de concha, o que favorece organismos calcificantes (Gallardo et al., 2018; Zhang et al., 2025) e assemelha o material a recifes biogênicos (Guo et al., 2021). O traço ternário R33Se33Sh33 também obteve alta biomassa ($\approx 1,53$ g), confirmando que a mistura de três areias gera heterogeneidade mineralógica e textura, criando nichos micro ambientais favoráveis (Guo et al., 2021; Ly et al., 2021).

Por fim, os traços Se100 e Sh100 obtiveram valores intermediários. O desempenho inferior do Sh100 em relação ao R50Sh50 indica que o excesso isolado de carbonato de cálcio prejudica propriedades como porosidade, alcalinidade e textura efetiva, provando que a colonização exige equilíbrio multifatorial (Gallardo et al., 2018; Zhang et al., 2025).

FIGURA 3 - DESENVOLVIMENTO DE BIOFILMES;



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Nesse contexto, o melhor desempenho observado no traço R50Sh50 pode estar relacionado justamente ao equilíbrio promovido pela combinação entre areia de rio e areia de concha, proporcionando simultaneamente disponibilidade de carbonatos e maior diversidade textural superficial, favorecendo a formação e retenção da comunidade biológica aderida.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou com sucesso a viabilidade de argamassas ecoeficientes produzidas por manufatura aditiva para aplicações subaquáticas. A incorporação de metacaulim, filer calcário e agregados alternativos, como areia de mar e areia de concha residual (*Anomalocardia flexuosa*), reduziu o impacto ambiental e potencializou expressivamente a bioreceptividade e biocompatibilidade dos compósitos no meio marinho. O traço R50Sh50 estabeleceu o melhor equilíbrio de propriedades superficiais, gerando o maior acúmulo de biomassa e estimulando o desenvolvimento de biofilmes e organismos pioneiros calcificantes. Conclui-se que o uso equilibrado de agregados alternativos e cimentos modificados atua como indutor de biodiversidade, oferecendo diretrizes técnicas valiosas para a engenharia ecológica e para a construção de infraestruturas marinhas e recifes artificiais de baixo impacto ambiental, altamente integrados e resilientes.

REFERÊNCIAS

- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of The Total Environment*, 167(1–3), 215–220. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04582-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04582-L)
- Browne, M. A., & Chapman, M. G. (2011). Ecologically Informed Engineering Reduces Loss of Intertidal Biodiversity on Artificial Shorelines. *Environmental Science & Technology*, 45(19), 8204–8207. <https://doi.org/10.1021/es201924b>
- Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., & De Belie, N. (2014). Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. *Science of The Total Environment*, 481, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.059>
- Ruviaro, A. S., Silvestro, L., Scolaro, T. P., Pelisser, F., & Gleize, P. J. P. (2020). Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. *Ambiente Construído*, 20(4), 243–260. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>
- Barbosa, M. S., dos Anjos, M. A. S., Cabral, K. C., & Dias, L. S. (2022). Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. *Construction and Building Materials*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127775>