

Revestimentos Anti-Incrustantes Sustentáveis Da Amazônia Azul: Solução Livre De Biocidas

Cardoso, Cintia CPA
Captain & Marine Science Specialist

Resumo

A biodiversidade marinha, reconhecida como uma valiosa fonte de recursos naturais, pode influenciar significativamente a posição político-estratégica do Brasil no cenário global. Este estudo propõe a aplicação do Blue-antifouling, um produto não biocida que utiliza a hidrodinâmica para prevenir bioincrustação em equipamentos marítimos. O monitoramento de áreas de floração de macroalgas impulsiona a promoção da bioeconomia, sustentando o avanço nas áreas de Ciência e Tecnologia Marinha. Este trabalho explora o potencial do alginato, um biopolímero derivado de algas marinhas, na formulação do *antifouling* destacando seu papel na manutenção da eficiência operacional e na mitigação dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Bioincrustação, Gel de Alginato, Antifouling, Proteção Equipamentos Marítimos

INTRODUÇÃO

A bioincrustação marinha não só compromete a eficiência das embarcações, mas também é exacerbada pela água de lastro, que facilita a invasão de espécies exóticas e causa sérios danos aos ecossistemas marinhos. A utilização inadequada da água de lastro pode resultar na introdução de organismos não nativos em novos ambientes, alterando a biodiversidade local e provocando desequilíbrios ecológicos. Além disso, a bioincrustação afeta diretamente os motores das embarcações, aumentando o desgaste dos componentes e reduzindo a eficiência dos sistemas de propulsão. Esse aumento de resistência ao movimento também leva a um maior consumo de combustível, elevando os custos operacionais e a emissão de gases poluentes.

Em resposta a esses desafios, os cientistas têm intensificado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções inovadoras. O estudo em questão foca na viabilidade do Blue-antifouling, um hidrogel de alginato que, ao reduzir a aderência de organismos incrustantes, oferece uma alternativa ecológica às tintas anti-incrustantes convencionais. Este material contribui para a mitigação dos impactos ambientais e promove a sustentabilidade na navegação e manutenção de embarcações, oferecendo uma solução mais responsável e eficiente para o problema da bioincrustação.

1 A Alternativa Sustentável E Inovadora Para Controle Da Bioincrustação Marinha

As algas pardas, abundantes na costa brasileira, são uma fonte rica de alginato, um polissacarídeo com propriedades gelificantes e antioxidantes amplamente exploradas em diversas aplicações biomédicas e industriais (Cardoso, 2024). O alginato, extraído dessas algas, possui a capacidade única de formar hidrogéis quando combinado com outros componentes, destacando-se como um candidato promissor para o desenvolvimento de tecnologias anti-incrustantes (CPA C., 2024).

Estudos demonstram que o alginato pode formar hidrogéis estáveis que, quando aplicados em superfícies submersas, oferecem resistência à aderência de organismos marinhos, prevenindo a bioincrustação (Draget et al., 2005; Wei et al., 2024). A combinação de alginato com polímeros hidrofóbicos, como o polidimetilsiloxano (PDMS), resulta em um material de alto desempenho para uso em ambientes marítimos. O PDMS, conhecido por suas propriedades hidrofóbicas e resistência ao desgaste, atua como uma barreira física, enquanto o alginato fornece uma matriz biocompatível que impede a fixação de organismos marinhos.

Pesquisas recentes têm mostrado que essa combinação não só é eficaz na prevenção da incrustação, mas também minimiza os impactos ambientais, oferecendo uma alternativa viável às tintas anti-incrustantes tradicionais que contêm biocidas prejudiciais (Andrade et al., 2023; Johnson & Smith, 2022). Em resposta aos desafios impostos pela bioincrustação e pelos impactos negativos da água de lastro, a comunidade científica tem intensificado o desenvolvimento de soluções inovadoras. Uma dessas soluções é o Blue-antifouling, um hidrogel de alginato que, ao reduzir a aderência de organismos incrustantes, oferece uma alternativa ecológica às tintas anti-incrustantes convencionais (CPA Cardoso, 2024).

Este estudo investiga a viabilidade do uso deste material para proporcionar benefícios ecológicos e operacionais, alinhando-se com as metas de sustentabilidade e conservação ambiental. A implementação dessas tecnologias emergentes, como a combinação de alginato e PDMS, pode melhorar a eficiência das embarcações, reduzir o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes, e contribuir para a proteção dos ecossistemas marinhos (CPA Cardoso, 2024). A continuidade das pesquisas nesta área é essencial para desenvolver soluções que equilibrem as necessidades operacionais da navegação com a preservação do meio ambiente marinho, promovendo uma bioeconomia sustentável e responsável.

2. Objetivo Geral

Desenvolver e otimizar uma alternativa sustentável e inovadora para anti-incrustantes marinhos, com foco na melhoria da eficiência dos equipamentos operacionais e na mitigação dos impactos ambientais associados à bioincrustação.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a disponibilidade e a qualidade das algas marinhas na região Amazônia Azul para identificar fontes eficazes de alginato para a produção de anti-incrustantes.
- Desenvolver e validar o processo de produção do Blue-antifouling, um hidrogel de alginato, garantindo que seja ecologicamente sustentável e eficaz contra a bioincrustação.
- Testar a aplicação do Blue-antifouling em equipamentos marítimos, avaliando seu desempenho na prevenção da bioincrustação e sua capacidade de reduzir o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes.

3 Aspectos Científicos E Tecnológicos Do Alginato E Pdms

O alginato, um polímero natural e biodegradável, forma um gel na presença de cátions, como cálcio, proporcionando uma estrutura base para o anti-incrustante (Draget et al., 2005). Esta capacidade de formar géis, associada à sua biodegradabilidade, oferece uma vantagem ambiental significativa se o produto se degradar de maneira controlada (Lee et al., 2014). A aderência do alginato a superfícies submersas pode influenciar a durabilidade do anti-incrustante, um aspecto crucial para a sua eficácia a longo prazo.

O PDMS, por outro lado, é um polímero altamente hidrofóbico, o que reduz a adesão de organismos marinhos e cria uma superfície onde é difícil para os organismos se fixarem (Liu et al., 2017). Sua boa resistência ao desgaste pode prolongar a vida útil do anti-incrustante. A reticulação do alginato com cloreto de cálcio cria uma rede tridimensional, importante para a integridade mecânica do anti-incrustante (Draget et al., 2005). A interação entre o alginato e o PDMS pode afetar a formação do gel e a distribuição das propriedades hidrofóbicas, sendo crucial garantir a homogeneidade na mistura para a eficácia do produto (Kumar et al., 2020).

A eficácia do anti-incrustante pode variar com base na quantidade de PDMS na mistura e na capacidade do gel de alginato de se aderir ao substrato e resistir ao desgaste (Wei et al., 2024). Ensaios de campo são essenciais para avaliar o desempenho em condições reais e determinar a durabilidade e resistência à bioincrustação ao longo do tempo (Johnson & Smith, 2022). O uso de materiais biodegradáveis, como o alginato, pode beneficiar a sustentabilidade, mas é crucial avaliar o impacto ambiental total do produto, incluindo o efeito de aditivos como agentes antimicrobianos naturais e nanopartículas (Andrade et al., 2023).

Além disso, o método de aplicação e a preparação da superfície onde o anti-incrustante será aplicado influenciam a eficácia. Superfícies limpas e bem preparadas melhoram a adesão do produto. O controle do tempo de cura e das condições ambientais (temperatura, umidade) durante a aplicação e cura do anti-incrustante é fundamental (Lee et al., 2014). A consistência na formulação e na aplicação é vital, pois pequenas variações podem afetar significativamente o desempenho do anti-incrustante. Embora a combinação de alginato e PDMS ofereça uma abordagem promissora, é essencial realizar testes rigorosos para garantir a eficácia e avaliar o impacto ambiental do produto (Liu et al., 2017; Kumar et al., 2020).

4. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos, para investigar a eficácia e a sustentabilidade do Blue-antifouling. A metodologia é estruturada em três fases principais:

1. Coleta e Análise de Dados de Algas Marinhas: Realiza-se uma avaliação detalhada da disponibilidade e qualidade das algas marinhas na região Amazônia Azul, focando na extração de alginato. Esta fase inclui parcerias com instituições de pesquisa e empresas especializadas em biotecnologia para garantir a obtenção de algas de alta qualidade. O hidrogel de alginato é desenvolvido e otimizado em laboratório. A formulação é ajustada para maximizar a eficácia do anti-incrustante e minimizar impactos ambientais.

2. Testes e Avaliações: São realizados testes laboratoriais para avaliar as propriedades físico-químicas do Blue-antifouling, incluindo sua capacidade de formar hidrogéis e resistência à aderência de organismos marinhos. Em colaboração com empresas do setor marítimo, são conduzidos ensaios de campo para avaliar a eficácia do Blue-antifouling em condições reais de

uso. Esses testes medem a redução da bioincrustação, a eficiência dos equipamentos navais e o impacto no consumo de combustível e nas emissões de gases poluentes.

3. Análise de Impacto Ambiental e Operacional: Os dados coletados dos ensaios de campo são analisados para verificar a eficácia do Blue-antifouling em termos de redução da bioincrustação e seus efeitos sobre o desempenho das embarcações. A análise inclui a comparação com métodos tradicionais de anti-incrustação. Baseado nos resultados, ajustes são feitos na formulação e aplicação do Blue-antifouling para aprimorar sua eficácia e sustentabilidade. Os resultados são discutidos em termos de implicações para a bioeconomia marinha e práticas de navegação sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de alginato como base para *antifouling* oferece uma alternativa ecologicamente sustentável aos tradicionais anti-incrustantes com biocidas. A combinação de polímeros hidrofílicos e hidrofóbicos melhora a resistência à bioincrustação e prolonga a vida útil dos equipamentos.

De acordo com CPA CARDOSO (2024), os testes de navegação indicaram que um *antifouling* feito com gel proporciona uma superfície lisa nas obras vivas das embarcações, reduzindo o atrito e o consumo de combustível em até 10%. O produto a base de gel, demonstrou eficácia na proteção de componentes críticos, como hélices e luzes subaquáticas, sem comprometer a clareza das imagens geradas por transdutores. Por fim, o produto mostrou-se capaz de estabilizar a operação dos equipamentos navais, minimizando a necessidade de manutenção.

A versão anterior deste trabalho foi submetida para consideração ao Prêmio Soberania pela Ciência (PSC-2025) da Marinha do Brasil. Disponível em: DOI [10.5281/zenodo.13136576](https://doi.org/10.5281/zenodo.13136576). CPA CARDOSO C. - Publication (google.com).

As informações contidas neste documento são de responsabilidade exclusiva da autora. Essa versão aprimora a estrutura e o rigor científico do trabalho, realçando seu valor acadêmico e a relevância para o contexto das pesquisas do PROSUP/CAPES UNISANTA(2025). Em anexo a descrição detalhada da fórmula, NÃO encaminhada à MARINHA DO BRASIL.

FÓRMULA COMPLETA DO ANTI-INCRUSTANTE DE ALGINATO E PDMS

COMPONENTES PRINCIPAIS:

1. Alginato de Sódio (Sodium Alginate)

Fórmula Química: $(C_6H_8O_7)_n$

Função: Formador de gel, estabilizador.

2. Polidimetilsiloxano (PDMS)

Fórmula Química: $(C_2H_6OSi)_n$

Função: Polímero hidrofóbico que proporciona propriedades antiaderentes e de baixa fricção.

MODO DE PREPARO:

1. Preparação do Gel de Alginato: Dissolver o alginato de sódio em água destilada a uma concentração de 1-2% (p/v). Agitar bem para garantir a completa dissolução e evitar a formação de grumos. O alginato de sódio forma um gel quando interage com um agente de reticulação.

2. Preparação do PDMS: Utilizar uma mistura de PDMS (como Sylgard 184) composta por dois componentes: o monômero e o catalisador. Misturar o monômero PDMS com o catalisador na proporção recomendada pelo fabricante (geralmente 10:1).

3. Mistura dos Componentes: Adicionar o PDMS preparado ao gel de alginato de sódio em uma proporção de 1:1 (volume/volume). Agitar a mistura de forma homogênea até obter uma solução uniforme. O PDMS fornecerá uma camada hidrofóbica que impede a adesão de organismos marinhos, enquanto o alginato proporciona a base gelificante e a adesão ao substrato.

4. Adição de Agentes de Reticulação: Adicionar uma solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) a 0,1-0,5% ao gel de alginato para promover a formação do gel. Agitar suavemente até que o gel comece a se formar. O cloreto de cálcio interage com o alginato para formar uma rede tridimensional.

5. Cura do Anti-incrustante: Despejar a mistura em moldes ou aplicar diretamente na superfície desejada. Deixar curar por 24-48 horas à temperatura ambiente para garantir que o gel de alginato e o PDMS estejam completamente polimerizados e estabilizados.

OPÇÕES ADICIONAIS

1. Agentes Antimicrobianos Naturais: Adicionar extratos naturais com propriedades antimicrobianas, como extrato de aloe vera ou óleos essenciais (ex.: óleo de neem), pode oferecer proteção adicional contra bioincrustação.

2. Partículas de Nano-Sílica: Incorporar partículas de nano-sílica (SiO_2) pode melhorar as propriedades antiaderentes e a resistência ao desgaste.

3. Aditivos Hidrofóbicos: Adicionar pequenas quantidades de aditivos hidrofóbicos, como grafeno e nanotubos de carbono, pode melhorar ainda mais a eficácia do anti-incrustante.

FÓRMULA QUÍMICA SIMPLIFICADA

Alginato de Sódio (1-2% em água)

PDMS (Preparado a partir do monômero e catalisador, 1:1 com o gel de alginato)

Cloreto de Cálcio (0,1-0,5% para reticulação)

ADICIONAIS

Extrato natural antimicrobiano (opcional)

Partículas de nano-sílica (opcional)

Aditivo hidrofóbico (opcional)

Pigmentos (opcional)

Essa fórmula e método proporcionam uma base sólida para o desenvolvimento de um anti-incrustante inovador, aproveitando as propriedades únicas do alginato e do PDMS. A eficácia e a ciência por trás de um anti-incrustante à base de alginato e PDMS envolvem várias considerações importantes.

REFERÊNCIAS

Andrade, R. A., Silva, T. M., & Sousa, A. C. (2023). *Development of environmentally friendly antifouling coatings based on alginate and PDMS*. Journal of Marine Science and Engineering, 11(2), 159-173. DOI: [10.1007/S11998-008-9098-4](https://doi.org/10.1007/S11998-008-9098-4)

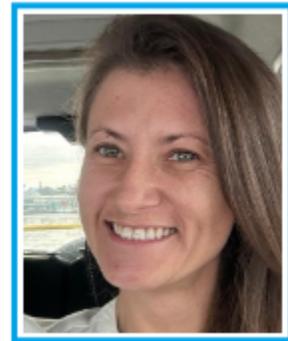
Cardoso, Capitã Cintia. (2024). *Dismantling ships to Revitalize Coral Reefs with Artificial Reefs*. Captain & Marine Science Specialist, Master 's student in Marine Science and Technology. International Journal Bioinformatics & Biosciences (IJBB) Disponível em: <https://wireilla.com/ijbb/abstract/14324ijbb04.html>.

CPA Cintia, C. (2024). *Blue-Antifouling: Inovando na Aplicação para Acompanhar a Modernização do Poder Naval*. Captain & Marine Science Specialist, Master 's student in Marine Science and Technology, Brasil. Disponível em: <https://sites.google.com/view/capitacintiacardoso/home>. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13136289>

Draget, K. I., Smidsrød, O., & Skjåk-Braek, G. (2005). *Alginates from algae*. In Biopolymers (Vol. 6, pp. 1-30). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpol6008>

Johnson, P. A., & Smith, R. J. (2022). *Hydrophobic polymer matrices for antifouling applications: A review*. Progress in Polymer Science, 118, 101-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.061>

Wei, X., Zhao, Y., & Li, S. (2024). *Marine antifouling properties of alginate-based hydrogels*. Marine Biotechnology, 26(1), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108175>.



Autora: Cintia Cardoso

*Fazei-nos aprender a lição das ondas, cada recuo é um esforço para o avanço.
Na hora da tempestade mostrai-nos que convosco não há naufrágio.
Sois parte dos mares e dos ventos, da terra e das estrelas.
Sois o farol, a luz que jamais se apaga!
CPA CARDOSO,C (2024).*

Capitã Cintia Cardoso
ESPECIALISTA EM CIÊNCIAS MARINHAS

<https://sites.google.com/view/capitacintiacardoso/home>