

## BIOPOLÍMEROS COMO MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA REVESTIMENTOS DE DUTOS DE PETRÓLEO: DESEMPENHO, VANTAGENS E DESAFIOS

Wanderley de Oliveira Bezerra<sup>1</sup>, Dennys Correia da Silva<sup>2</sup>,  
Meyrelle Figueiredo Lima<sup>3</sup>, Alcides de Oliveira Wanderley  
Neto<sup>4</sup>

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- [wanderley.bezerra.705@ufrn.edu.br](mailto:wanderley.bezerra.705@ufrn.edu.br)

2 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- [dennys.correia.024@ufrn.edu.br](mailto:dennys.correia.024@ufrn.edu.br)

3 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- [meyrelle.lima.059@ufrn.edu.br](mailto:meyrelle.lima.059@ufrn.edu.br)

4 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- [alcides.wanderley@ufrn.br](mailto:alcides.wanderley@ufrn.br)

**Palavras-Chave:** Biopolímeros, corrosão, petróleo, revestimento.

### Introdução

Nos últimos anos, a crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por novos materiais que minimizem os impactos ambientais das atividades industriais. Nesse contexto, os biopolímeros emergem como uma alternativa viável e promissora para aplicações diversas, incluindo revestimentos de dutos de petróleo. Esses materiais, derivados de fontes renováveis, oferecem uma solução que não apenas atende às exigências técnicas, mas também contribui para a redução da pegada ecológica do setor energético (Goes, Pedro, 2024; Clemesha, Martin, 2023).

Os dutos de petróleo, fundamentais para o transporte desse recurso, enfrentam diversos desafios relacionados à proteção contra corrosão, resistência mecânica e durabilidade. Tradicionalmente, os revestimentos utilizados são baseados em polímeros sintéticos, que, embora eficazes, apresentam desvantagens significativas, como a dependência de recursos fósseis e a dificuldade de degradação no meio ambiente. A transição para biopolímeros pode representar uma mudança significativa na abordagem dos revestimentos, alinhando a indústria a práticas mais sustentáveis (Valéria D. Bastos, 2007; Martin Clemesha, 2023).

Os biopolímeros são materiais poliméricos obtidos a partir de matérias-primas renováveis, como plantas e microorganismos. Além de sua origem sustentável, esses materiais apresentam características que podem ser adaptadas para atender às necessidades específicas dos dutos de petróleo (Rafaela C. et, al., 2023; Fernanda Cavalcante, 2020). Por exemplo, propriedades como resistência à abrasão, impermeabilidade e flexibilidade podem ser ajustadas através de modificações químicas e físicas, ampliando o leque de aplicações.

Uma das principais vantagens dos biopolímeros é a sua biodegradabilidade, o que os torna uma opção atraente em comparação aos polímeros convencionais. Com a capacidade de se decompor de maneira mais eficiente no ambiente, os biopolímeros podem reduzir a acumulação de resíduos plásticos, uma preocupação crescente em todo o mundo. Essa característica se alinha com as metas globais de sustentabilidade e a necessidade de soluções que minimizem os impactos ambientais das atividades industriais (Eycle, 2024; Res Brasil, 2024; Biopdi, 2024).

No entanto, a implementação de biopolímeros como materiais de revestimento para dutos de petróleo não é isenta de desafios. Questões como a variabilidade na qualidade das matérias-primas, o custo de produção e a necessidade de desenvolvimento de tecnologias

adequadas para processamento e aplicação devem ser cuidadosamente avaliadas. Essas barreiras podem afetar a aceitação e a viabilidade econômica dos biopolímeros no mercado (Reis Miguel et al. 2024; Leadvent Group, 2024)

Além disso, é fundamental conduzir pesquisas que explorem o desempenho a longo prazo desses materiais sob condições extremas, como pressão e temperatura elevadas, típicas dos ambientes em que os dutos operam. Ensaio de durabilidade, resistência à corrosão e a interação com diferentes fluidos são essenciais para garantir que os biopolímeros possam competir com as opções convencionais, sem comprometer a segurança e a eficiência (Reis Miguel et al. 2024)

Portanto, a avaliação dos biopolímeros como materiais sustentáveis para revestimentos de dutos de petróleo representa uma oportunidade promissora de inovação (Cheng & Zhang, 2021; Khan & Aslam, 2020). Ao equilibrar desempenho, sustentabilidade e viabilidade econômica, esses materiais podem contribuir para a transição da indústria de petróleo para práticas mais responsáveis e alinhadas com as demandas contemporâneas por um futuro mais sustentável.

## **Material e Métodos**

O estudo adotou uma abordagem metodológica dividida em duas etapas principais para explorar o uso de biopolímeros como materiais sustentáveis para revestimentos de dutos de petróleo. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura utilizando diversas bases de dados acadêmicas, como ScienceDirect e Google Scholar. Foram empregadas palavras-chave relevantes, como “biopolímeros”, “revestimentos de dutos”, “sustentabilidade” e “propriedades mecânicas”, para identificar artigos científicos, revisões e relatórios técnicos pertinentes ao tema.

A seleção dos artigos foi baseada em critérios de relevância, focando em informações sobre a produção, propriedades e aplicações de biopolímeros especificamente para revestimentos de dutos. Essa revisão proporcionou uma visão abrangente sobre o estado atual da pesquisa nesse campo, permitindo a identificação de tendências e padrões comuns nas soluções propostas.

Em seguida, foram analisados estudos específicos relacionados à fabricação de revestimentos utilizando biopolímeros, com ênfase em materiais como alginato, pectina e compostos de origem vegetal. Essa análise envolveu a avaliação dos métodos de preparação dos revestimentos, incluindo a extração dos biopolímeros, formulação das misturas, processos de reticulação e caracterização das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais resultantes.

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise qualitativa, destacando aspectos relevantes como eficiência de produção, durabilidade, resistência à corrosão, permeabilidade e potenciais aplicações industriais dos biopolímeros. Essa abordagem permitiu uma compreensão profunda do desempenho desses materiais em condições específicas de operação nos dutos de petróleo.

Além de identificar os benefícios dos biopolímeros, a análise evidenciou os desafios que ainda precisam ser superados para sua adoção em larga escala. Questões relacionadas à variabilidade dos materiais e aos custos de produção foram cuidadosamente discutidas, fornecendo uma perspectiva crítica sobre a viabilidade econômica.

A investigação revelou que, embora os biopolímeros apresentem propriedades promissoras, a transição para o uso em dutos de petróleo requer pesquisa adicional. É essencial explorar a durabilidade e o desempenho sob condições operacionais extremas, que são comuns na indústria. A interação dos biopolímeros com diferentes fluidos e ambientes corrosivos também precisa ser analisada.

Em suma, esta pesquisa trouxe descobertas valiosas sobre o uso de biopolímeros na indústria do petróleo. Compreender o papel desses materiais sustentáveis pode contribuir significativamente para que a indústria avance em direção a práticas mais responsáveis e alinhadas com as demandas atuais por sustentabilidade.

## **Resultados e Discussão**

### **Chen et al. (2021)**

Relataram a utilização de tubos compostos de bambu como uma alternativa biológica para a condução de água, visando substituir tubos de PVC e concreto em serviços de água e esgoto de baixa a média pressão. Esses tubos estão disponíveis em diversos tamanhos, com diâmetros de 150 mm a 5000 mm e espessuras de parede entre 9 mm e 38 mm, podendo ser aplicados em outras áreas. Udayakumar et al. 2021, mostraram que os biopolímeros são biocompatíveis e biodegradáveis, o que os torna úteis em várias aplicações industriais. Além disso, esses materiais têm um potencial significativo para substituir polímeros sintéticos. Embora compósitos verdes possam substituir compósitos sintéticos, novos materiais exigem identificação e estudo de suas propriedades mecânicas. O crescente interesse em biopolímeros destaca sua relevância para a sustentabilidade (Venkatesha P. et al. 2020).

### **Mariem Fardioui et al, (2021)**

De acordo com o autores, o 8-hidroxiquinolina-alginato enxertado (HQ-g-Alg) foi desenvolvido como um inibidor de corrosão para aço macio em solução de HCl 1 M. A estrutura do alginato modificado foi confirmada por FT-IR e RMN. Estudos eletroquímicos, de morfologia de superfície, DFT e simulação dinâmica molecular foram realizados para avaliar suas propriedades anticorrosivas. O alginato modificado mostrou-se um inibidor de tipo misto, com aumento da resistência à polarização conforme a concentração dos inibidores aumentava. Em todas as temperaturas testadas, a eficiência de inibição foi superior à do alginato não modificado, destacando os efeitos sinérgicos das moléculas enxertadas na proteção do aço em meio ácido.

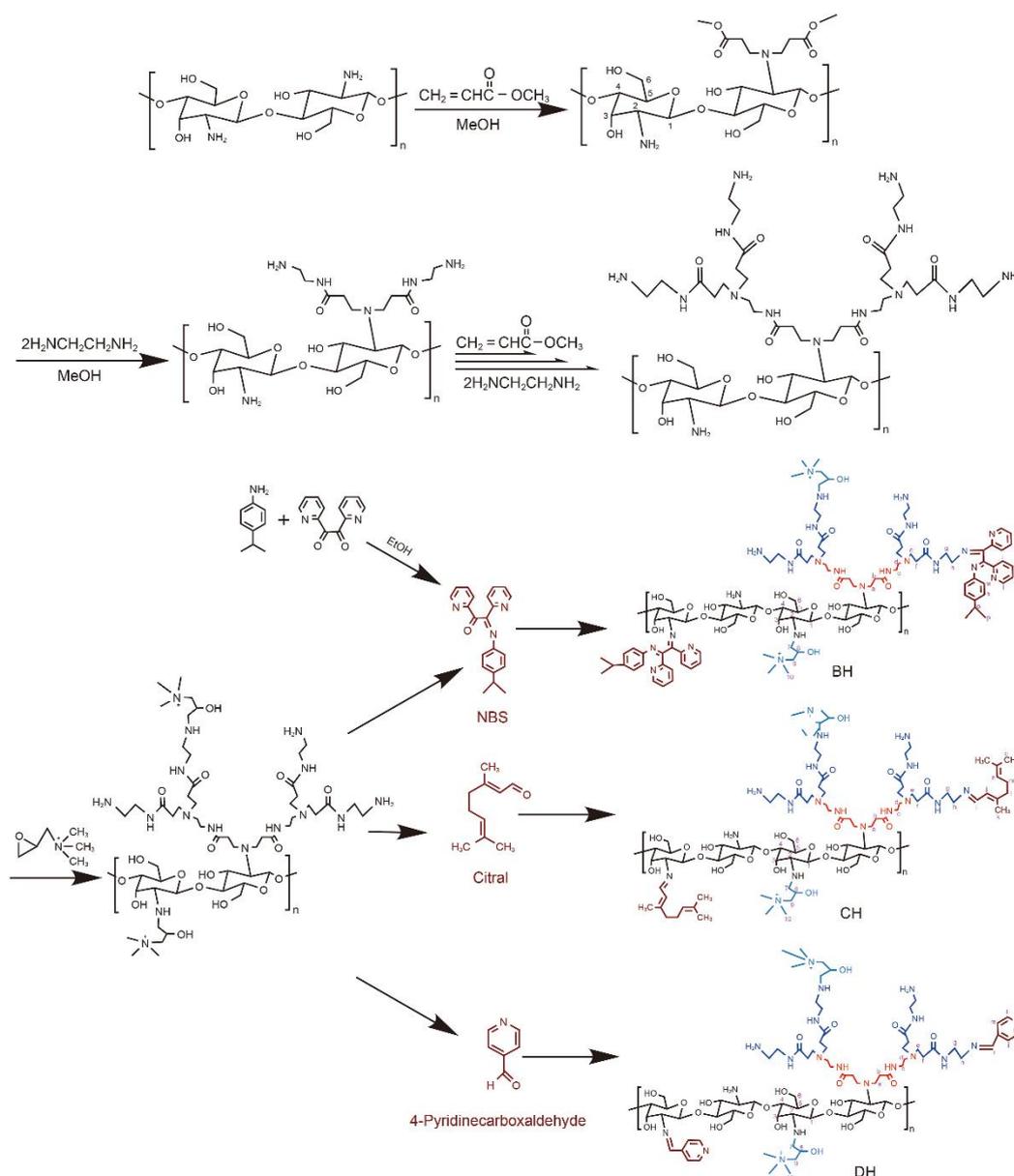
### **Luciano Procópio, (2023)**

Destaca que a corrosão microbiologicamente influenciada (CIM) representa 20% dos custos relacionados a danos de corrosão em diversos setores produtivos. Vários microrganismos, especialmente bactérias redutoras de sulfato (SRB) e metanogênicas do filo Archaea, são fundamentais nesse processo, acelerando a corrosão por meio da transferência de elétrons extracelulares (EET) em biofilmes corrosivos. Apesar das várias metodologias para estudar biofilmes, a metagenômica tem se destacado ao fornecer importantes insights sobre microrganismos que utilizam EET para intensificar a corrosão. Essa técnica permite a análise de amostras coletadas in situ, identificando quais microrganismos estão diretamente envolvidos na corrosão em diferentes condições ambientais.

### **Guo Dong, et al. (2023)**

Afirmam que a corrosão de dutos e equipamentos na exploração de petróleo e gás, resultante de ambientes ácidos e processos de transporte, acarreta perdas econômicas e riscos à segurança. O estudo analisou três inibidores de corrosão ecologicamente corretos derivados da quitosana, nomeadamente BH, CH e DH. A eficácia desses inibidores foi avaliada em aço macio exposto a uma solução de HCl 1 mol/L, demonstrando eficiências de inibição superiores a 80% com 500 mg.L<sup>-1</sup>. Cálculos químicos quânticos identificaram os centros ativos, como o anel benzênico e o átomo de nitrogênio, que contribuem para a formação de um filme protetor. A ordem de eficácia observada foi BH > DH > CH, corroborando com os resultados experimentais. Assim, esses inibidores se mostram como uma solução promissora e sustentável para reduzir a corrosão na indústria.

Fig. 1. As rotas sintéticas dos derivados hiperramificados do oligômero de quitosana BH, CH e DH.



Fonte: Guo Dong, et al. (2023)

### Jibrilla Abdulrahman, et al. (2024)

Na indústria de petróleo e gás, a demanda por materiais alternativos está crescendo devido à corrosão e à necessidade de reduzir custos e peso. Os compósitos poliméricos se

destacam pela resistência à corrosão e pela relação favorável entre resistência e peso, com o mercado de biopolímeros projetado para atingir US\$ 4,95 bilhões entre 2021 e 2025, com um crescimento anual de 5,38%. Esta pesquisa analisa o potencial das fibras naturais, como basalto e banana, como reforços em tubos compostos. Enquanto a fibra de basalto já tem aplicações práticas, os compósitos de fibra de banana ainda estão em fase de estudos. Apesar do apoio da indústria, são necessárias mais investigações para enfrentar desafios relacionados à compatibilidade, impacto ambiental e durabilidade.

Deepa et al. 2022, destacaram as oportunidades para novas e existentes aplicações da fibra de banana, enfatizando seu potencial para impulsionar negócios agrícolas e agregar valor à cadeia de produção do cultivo de banana, sem causar impactos ambientais. Nesse contexto, diversos pesquisadores têm investigado a fibra de bananeira para a criação de tubos compostos de biopolímero. Ihueze et al. 2017, desenvolveram um tubo biocompósito destinado a aplicações de pressão moderada no setor de petróleo e gás, utilizando partículas de fibra de banana em combinação com resina HDPE, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Tubo composto de biopolímero



Fonte: International Journal of Polymer Science, de Jibrilla Abdul Rahman, et al., (2024).

#### **Ugbetan V., et al. (2024)**

As propriedades anticorrosivas do amido de batata, amido de milho, copolímero PS-PVAGC e um biopolímero modificado foram avaliadas. O PS-PVAGC foi preparado por enxerto de amido de batata em PVA, enquanto o biopolímero foi feito com amido, NaOH e bórax. Testes de perda de peso em aço macio em HCl 1,0 M mostraram que o amido de milho teve uma eficiência inibidora (IE) de 38,52%, enquanto o amido de batata alcançou 79,81%. O biopolímero modificado apresentou um IE máximo de 87,90%, e o PS-PVAGC obteve 92,5%. Todos os inibidores mostraram redução nas taxas de corrosão com aumento da concentração. O baixo desempenho do amido puro foi atribuído à sua baixa solubilidade e adesão. As análises FTIR indicaram que grupos OH foram fundamentais para a adsorção e supressão da corrosão.

#### **Sundar, S.K. & Solanki, J. (2024)**

Os autores afirmam que a deterioração de materiais causada pela interação com o meio ambiente é uma preocupação global significativa. Os métodos convencionais de prevenção da corrosão, como proteção catódica, inibidores e revestimentos, apresentam desvantagens, incluindo o uso de substâncias nocivas e a possibilidade de falhas na adesão entre os revestimentos e os metais. No entanto, essas limitações podem ser superadas com a utilização de biopolímeros de origem natural, tanto em suas formas puras quanto em versões quimicamente alteradas, que melhoram as propriedades adesivas e mecânicas, assegurando a integridade estrutural. Os autores destacam que os biopolímeros são amplamente reconhecidos

como revestimentos anticorrosivos eficazes em diversas indústrias e na pesquisa científica, devido às suas notáveis características de barreira e à capacidade de produção em larga escala.

#### **Alireza Banan & Saeed Asadi, (2024)**

De acordo com Alireza e Asadi, o aço macio, amplamente utilizado em oleodutos e gasodutos, é suscetível à corrosão em ambientes com  $H_2S$  e  $CO_2$ . Na pesquisa realizada, foram sintetizados dois biopoliuretanos, um catiônico (CBP) e um não iônico (NIBP), a partir de óleo de mamona, para atuarem como inibidores de corrosão. Ambos mostraram alta eficácia em concentrações de 100  $\mu M$ , com eficiências de 96,1% e 94,9%, respectivamente. Análises eletroquímicas confirmaram a formação de uma camada protetora na superfície do aço. Além disso, ambos os biopolímeros apresentaram biodegradabilidade, com 38% e 42,1% de degradação em 30 dias. Essa natureza ecológica reforça sua atratividade para aplicações sustentáveis. A pesquisa sugere que esses biopolímeros são promissores para a proteção contra corrosão na indústria de petróleo e gás.

#### **Desafios das Aplicações de Biopolímeros na Indústria de Petróleo**

Os compósitos de biopolímeros enfrentam diversos desafios que dificultam sua aplicação na indústria de petróleo e gás. Um dos principais obstáculos é a necessidade de atender a requisitos regulatórios e certificações específicas (Gibson, 2023). Além disso, a falta de dados sobre o desempenho desses materiais em condições adversas limita sua adoção. A ausência de diretrizes claras para o design e as dificuldades na produção em larga escala também são questões significativas.

Outro desafio importante é a baixa resistência a altas temperaturas e ao fogo, o que levou a investigações para melhorar essas propriedades (Yücesoy et al., 2023). O controle de qualidade e a confiabilidade são preocupações adicionais, especialmente pela falta de histórico de desempenho a longo prazo (Laney, 2002). Para avançar, é essencial abordar questões como avaliação de desempenho e resistência à pressão externa (Barbosa et al., 2023).

#### **Lacunas de Pesquisa no Campo dos Biopolímeros**

A revisão atual, em conjunto com estudos de outros autores (Cole B.W,1995; Ramesh M. Flax 2019; Nanda S., et al. 2022; Berdugo Clavijo, et al 2022), destaca diversas lacunas no campo dos biopolímeros, conforme resumido na Tabela 1.

**Tabela 1.** Lacuna de pesquisa de biopolímeros.

<b>Lacuna de pesquisa</b>	<b>Recomendação para estudos futuros</b>
<b>Consistência e Padronização de Desempenho:</b> A variabilidade das propriedades devido a diferentes fontes, métodos de processamento e condições ambientais, além da falta de métodos de teste padronizados e controle de qualidade.	Desenvolver métodos de teste padronizados e protocolos de controle de qualidade é fundamental para assegurar um desempenho uniforme entre diferentes lotes e fontes.
<b>Resistência Mecânica e Durabilidade:</b> A resistência mecânica e a durabilidade são essenciais para aplicações mais amplas. É necessário entender como a ação	Investir em pesquisas que aumentem a resistência mecânica e a durabilidade dos biopolímeros, permitindo que eles

microbiológica pode causar defeitos em compósitos poliméricos.

concorram efetivamente com plásticos tradicionais derivados do petróleo.

**Biodegradabilidade e Impacto Ambiental:** É crucial investigar a biodegradabilidade das fibras naturais em diversos ambientes.

Realizar estudos aprofundados sobre o comportamento ambiental dos biopolímeros em diferentes condições e ecossistemas para garantir sua verdadeira sustentabilidade. Desenvolver técnicas de processamento eficientes e econômicas, como extrusão, moldagem por injeção e impressão 3D, é essencial para a ampla adoção nos diversos setores.

**Técnicas de processamento:** Garantir a compatibilidade das novas técnicas com a infraestrutura existente é importante.

**Distribuição das Partículas de Fibra:** Há uma necessidade de alcançar uma distribuição uniforme e consistente das partículas de fibra.

Melhore o método de mistura para obter aglomeração de partículas de alta qualidade.

**Modelagem e simulação:** avaliação de características críticas de desempenho.

Estabeleça bancos de dados críticos de desempenho para modelagem, projeto e validação final de tortas compostas em ambientes de serviço reais.

**Comportamento a longo prazo e envelhecimento:** trabalho limitado sobre o comportamento a longo prazo da fibra natural, especialmente sob carga de fadiga e histórico de desempenho.

Compreender o comportamento a longo prazo e o envelhecimento dos biopolímeros sob diferentes condições, como exposição à luz solar, umidade e variações de temperatura, é essencial para prever seu desempenho ao longo do tempo.

**Considerações regulatórias e de segurança:** falta o padrão para testes de fibra natural para apoiar sua aplicação em membros estruturais críticos que seja aceitável por regulamentação e certificação.

Criar regulatórios para biopolímeros é essencial para garantir a segurança do consumidor e do meio ambiente, incluindo a avaliação de riscos potenciais de novas formulações ou aditivos.

**Viabilidade econômica:** os biopolímeros são promissores, mas sua competitividade econômica ainda precisa ser melhorada em comparação com os compósitos poliméricos tradicionais de fontes sintéticas.

Pesquisas focadas na otimização de processos produtivos, redução de custos e desenvolvimento de aplicações de valor agregado podem contribuir para melhorar sua viabilidade econômica.

## Conclusões

A pesquisa sobre o uso de biopolímeros como materiais sustentáveis para revestimentos de dutos de petróleo destaca um potencial significativo para a transição da indústria em direção a práticas mais ecológicas. Os biopolímeros, oriundos de fontes renováveis, não apenas oferecem características técnicas promissoras, como resistência à corrosão e biodegradabilidade, mas também podem ajudar a mitigar os impactos ambientais associados ao uso de polímeros sintéticos.

Entretanto, apesar dos benefícios dos biopolímeros, existem obstáculos significativos que dificultam sua utilização em grande escala. A variabilidade na qualidade das matérias-primas, a necessidade de otimização das propriedades mecânicas e a viabilidade econômica em comparação aos materiais convencionais precisam ser abordadas por meio de pesquisas contínuas e desenvolvimento de tecnologias adequadas.

Além disso, as lacunas de pesquisa identificadas, como a padronização de métodos de teste e a compreensão do comportamento a longo prazo dos biopolímeros, são fundamentais para assegurar sua eficácia e segurança em aplicações críticas.

Assim, para que os biopolímeros se tornem uma solução viável, é fundamental que pesquisadores e empresas colaborem para superar os desafios atuais. Focando na inovação e na pesquisa, a adoção desses materiais sustentáveis na indústria do petróleo pode não apenas atender às necessidades operacionais, mas também ajudar a construir um futuro mais sustentável e responsável.

## Agradecimentos

Agradecemos sinceramente ao Laboratório de Tecnologia de Tensosativos e Processos de Separação pela estrutura e suporte essenciais, e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento pelo significativo apoio financeiro que possibilitou a realização deste estudo.

## Referências

- Abdulrahman, Jibrilla, Ebhota, Williams S., Tabakov, Pavel Y., Biopolymer Composite Materials in Oil and Gas Sector, *International Journal of Polymer Science*, 2024, 8584879, 18 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/8584879>
- Banan, A., & Asadi, S. (2024). Novel cationic and non-ionic biopolyurethanes for effective inhibition of mild steel corrosion in H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub> environment. *Industrial Crops and Products*, 221, 119320. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2024.119320>
- Barbosa T., Bastos R., De Boer H., and Rojas-Díaz R., Thermoplastic composite pipes: a reliable cost-effective solution for pre-salt, *Offshore Technology Conference Brasil*, 2019, Rio de Janeiro, Brazil, <https://doi.org/10.4043/29819-MS>.
- Bastos, Valéria Delgado. Biopolímeros e polímeros de matérias-primas renováveis alternativos aos petroquímicos. *Revista do BNDES*, rio de janeiro, v. 14, n. 28, p. 201-234, dez. 2007. Disponível em: <https://web.Bndes.Gov.Br/bib/jspui/handle/1408/11834>.
- Berdugo-Clavijo C., Scheffer G., Sen A., and Gieg L. M., Biodegradation of polymers used in oil and gas Operations: towards enzyme biotechnology development and field application, *polymers*. (2022) 14, no. 9
- Biopdi. Polímeros biodegradáveis: tudo o que você precisa saber. *Biopdi*, 2024. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/polimeros-biodegradaveis/>.
- Cavalcante, Fernanda. A promessa dos bioplásticos. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 290, p. 20-25, abr. 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-promessa-dos-bioplásticos/>.
- Chen M., Weng Y., Semple K., Zhang S., Jiang X., Ma J., Fei B. e Dai C., Sustentabilidade e inovação de produtos de tubos compostos de enrolamento de bambu, *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*. (2021) 144, artigo 110976, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110976>.

- Cheng, Y., & Zhang, Y. (2021). *The Role of Biopolymers in Sustainable Development: A Review*. Journal of Cleaner Production, 287, 125-138.
- Clemesha, Martin. Biopolímero é uma alternativa viável para indústrias? *Mundo do plástico*, 2023. Disponível em: <https://mundodoplastico.Plasticobrasil.Com.Br/oportunidades/biopolimero-e-uma-alternativa-viavel-para-industrias>.
- Cole B. W., Petroleum E&P industry perspective on the use of composites in offshore operations, 1995, no. 887, NIST special publication.
- Cui, G. D., Chen, Y. M., Zhang, Q. M., Wang, Z., Tang, T., Zhao, Q., Zhang, Y., Zhang, L. F., Gu, Y. Q., & Liu, Y. S. (2023). Three novel dendritic chitosan derivatives for inhibiting acid corrosion of petroleum pipelines. *Petroleum Science*, 20(6), 3918–3930. <https://doi.org/10.1016/J.PETSCI.2023.08.010>
- Deepa C. e Ramesh M., S. M. Rangappa, J. Parameswaranpillai, S. Siengchin, T. Ozbakkaloglu e H. Wang, Capítulo 7 - Fibras de bananeira, seus compósitos e aplicações, Fibras vegetais, seus compósitos e aplicações, 2022, Woodhead Publishing, 161–180.
- Eycle. Biopolímeros: o que são, tipos e aplicações. *eCycle*, 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/biopolimeros/>.
- Gibson A. G., The cost effective use of fibre reinforced composites offshore, Reino Unido, 2003, <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr039.pdf>
- Goes, Pedro. Biopolímero: A solução sustentável para a indústria plástica. *Dicionário do petróleo*, 2024. Disponível em: <https://dicionariodopetroleo.Com.Br/biopolimero-sustentabilidade/>.
- Ihueze C. C., Obele C. M., Abdulrahman J. e Ajemba R., Um Relatório sobre o Concurso de Bolsas de Pesquisa do Fundo de Desenvolvimento de Tecnologia de Petróleo sobre Projeto de Engenharia e Produção de Instalações de Petróleo e Gás Usando Plásticos Reforçados com Fibras de Banana, 2018.
- Ihueze C., Oluleye A., Okafor C. E., Obele C., Abdulrahman J. e Obuka S., Desenvolvimento de fibras de bananeira para aplicação no projeto de sistemas de produtos de petróleo e gás, *Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*. (2017) 7, nº 1.
- Khan, M. I., & Aslam, M. (2020). *Biopolymers and Their Composites for Oil and Gas Applications: A Review*. *Materials Today: Proceedings*, 24, 164-169.
- Laney P., Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas, 2002, Idaho International Engineering and Environmental Laboratory, Bechtel BWXT Idaho, LLC
- LEADVENT GROUP. Challenges in scaling up biopolymer production: technological and economic barriers. *Leadvent Group*, 27 set. 2024.
- Nanda S., Patra B. R., Patel R., Bakos J., and Dalai A. K., Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review, *Environmental Chemistry Letters*. (2022) 20, no. 1, 379–395, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>, [34867134](https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4).
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Nezafat, Z., & Shafiei, N. (2021). Polysaccharide biopolymer chemistry. *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications: Volume 1: Classification, Properties and Synthesis*, 45–105. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822108-2.00019-3>
- Obot, I. B., Onyeachu, I. B., & Kumar, A. M. (2017). Sodium alginate: A promising biopolymer for corrosion protection of API X60 high strength carbon steel in saline medium. *Carbohydrate Polymers*, 178, 200–208. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.09.049>
- Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*. (2017) 7, nº 1.
- Procópio, L. (2023). Metagenomic analysis of electroactive microorganisms in corrosion: Impact of the corrosive biofilms in the oil industry. *Understanding Microbial Biofilms: Fundamentals to Applications*, 109–124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99977-9.00037-5>
- Rahman, S.A.A., Priyadharsini, P., Deeksha, R.V. and Arun, J. (2023). Grafted Biopolymer Composites and Nanocomposites as Sustainable Corrosion Inhibitors. In *Grafted Biopolymers as Corrosion Inhibitors* (eds J. Aslam, C. Verma and R. Aslam). <https://doi.org/10.1002/9781119881391.ch18>
- Ramesh M., Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibre reinforced polymer composite materials: a review on preparation, properties and prospects, *Progress in Materials Science*. (2019) 102, 109–166, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.004>, 2-s2.0-85059442031.
- REIS, Miguel A. dos; RIBEIRO, Adolfo; HART, Robson (orgs.). *Biopolímeros: Estruturas, Propriedades e Aplicações*. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-98392-5. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-98392-5>.



RES Brasil. Polímeros biodegradáveis: O que você precisa saber. *RES Brasil*, 26 jan. 2024. Disponível em: <https://www.resbrasil.com.br/polimeros-biodegradaveis-o-que-voce-precisa-saber/>.

Sundar, S.K. e Solanki, J. (2024). Revestimento anticorrosivo com biopolímero natural. Em *Revestimentos Funcionais* (eds RK Arya, GD Verros e JP Davim). <https://doi.org/10.1002/9781394207305.ch6>

Udayakumar G. P., Muthusamy S., Selvaganesh B., Sivarajasekar N., Rambabu K., Banat F., Sivamani S., Sivakumar N., Hosseini-Bandegharai A., e Show P. L., Biopolímeros e compósitos: propriedades, caracterização e suas aplicações nas indústrias alimentícia, médica e farmacêutica, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. (2021) 9, nº 4, artigo 105322, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105322>.

Venkatesha Prasanna G., Jayadeep T. e Poornabhodha N., Tratamento químico, influência do teor de fibra e otimização de compósitos híbridos reforçados com fibras naturais, *Avanços em Materiais e Engenharia de Manufatura: Anais Seleccionados do ICMME 2019, 2020*, Springer, 325–335.

Yücesoy A., Tamer Y. B. e Berber H., Melhoria do retardamento de chama e estabilidade térmica de compósitos de polietileno/hidróxido de magnésio de baixa densidade altamente carregados, *Journal of Applied Polymer Science*. (2023) 140, nº 30, artigo E54107, <https://doi.org/10.1002/app.54107>