

DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS EPÓXI MODIFICADOS COM LIGNINA PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇO CARBONO

*DEVELOPMENT OF LIGNIN-MODIFIED EPOXY COATINGS FOR CORROSION
PROTECTION OF CARBON STEEL*



*DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS EPOXI MODIFICADOS CON LIGNINA
PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DEL ACERO AL
CARBONO*


Otílio Braulio Freire Diógenes¹



Matheus Ferreira de Castro²



Diego Lomonaco Vasconcelos de Oliveira³

Walney Silva Araújo⁴

¹   Graduado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Ceará (2016), com mestrado (2019) e doutorado (2023) em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente, é pesquisador no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Ceará e professor do departamento de Engenharias na Unifanor Wyden. Sua experiência abrange o estudo de revestimentos anticorrosivos e a corrosão de materiais metálicos.

²  Engenheiro metalurgista pela Universidade Federal do Ceará. Foi bolsista de iniciação científica e tecnológica pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (período de 2022 a SET/2024), sendo responsável pelo pré-tratamento de superfícies metálicas por jateamento abrasivo com granalha de aço (e esmerilhamento com disco removedor de revestimentos); ensaios acelerados de corrosão; análise por espectroscopia de impedância eletroquímica; serviços de análises e ensaios para empresas privadas e do Governo; com experiência na área de engenharia metalúrgica e de materiais, com ênfase em corrosão, atuando no estudo de revestimentos anticorrosivos industriais e renováveis e possui também conhecimentos básicos na área de inibidores de corrosão.

³   Possui graduação em Química Industrial (2006), mestrado em Química Orgânica (2008) pela Universidade Federal do Ceará, e doutorado sanduiche em Química (2011) pela Universidade Federal do Ceará e Università del Salento (Itália). Atualmente, é professor adjunto do Depto. de Química Orgânica e Inorgânica da Universidade Federal do Ceará (UFC), coordenando e desenvolvendo atividades de pesquisa e extensão no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT). É bolsista de Produtividade em Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq e membro permanente dos Programas de Pós-graduação em Química (PPGQ-UFC); Pós-graduação em Engenharia e Ciências de Materiais (PPGECM-UFC) e Pós-graduação em Odontologia (PPGO-UFC), ministrando disciplinas e orientando alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado.

⁴   Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (1996), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2003). Professor Titular da Universidade Federal do Ceará, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais e do Laboratório de Pesquisa em Corrosão. Professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Cariri.

Resumo: Os aços carbono, apesar de amplamente utilizados na indústria, apresentam alta suscetibilidade à corrosão, gerando impactos econômicos e ambientais relevantes. Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de revestimentos epóxi modificados com lignina, um subproduto renovável da indústria de celulose, como alternativa mais sustentável e menos tóxica ao diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), comum em resinas epóxi comerciais. Foram elaboradas formulações com 1%, 2,5% e 5% m/m de lignina, cujas propriedades foram avaliadas por meio de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), ensaios de ângulo de contato e testes de permeabilidade a íons Na^+ e Cl^- . Os revestimentos epóxi-lignina apresentaram desempenho promissor. Os ensaios de EIE demonstraram módulos de impedância superiores a $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para todas as concentrações testadas, indicando proteção eficaz contra a corrosão. Os testes de ângulo de contato revelaram comportamento hidrofóbico para as formulações com 2,5% (50,64°) e 5% (60°) de lignina, enquanto o revestimento com 1% apresentou caráter mais hidrofílico (36,95°). Já nos testes de permeabilidade, o revestimento com 5% de lignina foi o mais eficiente na barreira contra íons, com condutividade média final de cerca de $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ após 35 dias. Esses resultados indicam que os revestimentos epóxi-lignina combinam desempenho anticorrosivo, propriedades de barreira e caráter hidrofóbico, além de apresentarem menor impacto ambiental. Assim, demonstram potencial como substitutos sustentáveis para revestimentos comerciais à base de DGEBA, contribuindo para o avanço de tecnologias mais ecológicas na proteção de metais contra corrosão.

Palavras-chaves: Lignina; Corrosão; Revestimento Epóxi; Espectroscopia de impedância eletroquímica.

Abstract: Carbon steels, despite their widespread use in industry, exhibit high susceptibility to corrosion, generating significant economic and environmental impacts. Therefore, this work proposes the development of epoxy coatings modified with lignin, a renewable byproduct of the pulp and paper industry, as a more sustainable and less toxic alternative to diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), common in commercial epoxy resins. Formulations with 1%, 2.5%, and 5% w/w lignin were developed, and their properties were evaluated using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), contact angle tests, and permeability tests to Na^+ and Cl^- ions. The epoxy-lignin coatings showed promising performance. EIS tests demonstrated impedance moduli greater than $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ for all concentrations tested, indicating effective corrosion protection. Contact angle tests revealed hydrophobic behavior for the formulations with 2.5% (50.64°) and 5% (60°) lignin, while the coating with 1% showed a more hydrophilic character (36.95°). In permeability tests, the coating with 5% lignin was the most efficient in barrier against ions, with a final average conductivity of about $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ after 35 days. These results indicate that epoxy-lignin coatings combine anticorrosive performance, barrier properties and hydrophobic character, in addition to having a lower environmental impact. Thus, they demonstrate potential as sustainable substitutes for commercial DGEBA-based coatings, contributing to the advancement of more ecological technologies in the protection of metals against corrosion.

Keywords: Lignin; Corrosion; Epoxy Coating; Electrochemical impedance spectroscopy.

Resumen: Los aceros al carbono, a pesar de su amplio uso industrial, presentan una alta susceptibilidad a la corrosión, generando importantes impactos económicos y ambientales. Por lo tanto, este trabajo propone el desarrollo de recubrimientos epóxicos modificados con lignina, un subproducto renovable de la industria de la pulpa y el papel, como una alternativa más sostenible y menos tóxica al éter diglicídico de bisfenol A (DGEBA), común en las resinas epóxicas comerciales. Se desarrollaron formulaciones con 1%, 2,5% y 5% p/p de lignina, y sus propiedades se evaluaron mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), ensayos de ángulo de contacto y ensayos de permeabilidad a iones Na^+ y Cl^- . Los recubrimientos epóxicos-lignina mostraron un rendimiento prometedor. Los ensayos EIS demostraron módulos de impedancia superiores a $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para todas las concentraciones analizadas, lo que indica una protección eficaz contra la corrosión. Las pruebas de ángulo de contacto revelaron un comportamiento hidrofóbico para las formulaciones con 2,5% (50,64°) y 5% (60°) de lignina, mientras que el recubrimiento con 1% mostró un carácter más hidrofílico (36,95°). En las pruebas de permeabilidad, el recubrimiento con 5% de lignina fue el más eficiente como barrera contra iones, con una conductividad promedio final de aproximadamente $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ después de 35 días. Estos resultados indican que los recubrimientos de epoxi-lignina combinan rendimiento anticorrosivo, propiedades de barrera y carácter hidrofóbico, además de tener un menor impacto ambiental. Por lo tanto, demuestran potencial como sustitutos sostenibles de los recubrimientos comerciales basados en DGEBA, contribuyendo al avance de tecnologías más ecológicas en la protección de metales contra la corrosión.

Palabras clave: Lignina; Corrosión; Recubrimiento epoxi; Espectroscopía de impedancia electroquímica.

1 Introdução

Os aços carbono são amplamente utilizados em aplicações industriais devido à sua resistência mecânica e baixo custo. No entanto, sua alta suscetibilidade à corrosão representa um sério problema, principalmente em ambientes agressivos, como tubulações para transporte de óleo e gás. A corrosão não apenas compromete a integridade estrutural, como também pode provocar acidentes ambientais graves e perdas econômicas significativas. Estima-se que os custos relacionados à corrosão atinjam entre 3% e 4% do PIB global [1,2], evidenciando a dimensão econômica do problema. Do ponto de vista ambiental, a reposição de aço corroído contribui de forma significativa para as emissões associadas à produção siderúrgica, reforçando a urgência por estratégias de mitigação mais sustentáveis.

Nesse contexto, a aplicação de revestimentos orgânicos se destaca como uma das abordagens mais eficazes para mitigar processos corrosivos. Entre eles, revestimentos à base de resina epóxi são amplamente utilizados por apresentarem alta estabilidade, boa adesão ao substrato e resistência química. Contudo, a presença de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) nas formulações comerciais tem despertado crescente preocupação ambiental e toxicológica, incentivando a busca por alternativas parcial ou totalmente renováveis. Essa necessidade fundamenta a justificativa do presente estudo: a substituição parcial do DGEBA por lignina, um biopolímero abundante, de baixo custo e derivado da indústria de celulose, capaz de reduzir a dependência de insumos petroquímicos e atenuar impactos ambientais [3–5].

A lignina possui uma estrutura química rica em grupos fenólicos e aromáticos que pode atuar como barreira física à difusão de íons agressivos, além de conferir propriedades antioxidantes ao sistema. Diversos estudos recentes têm demonstrado que sua incorporação em matrizes epoxídicas resulta em melhoria do desempenho anticorrosivo dos revestimentos. Dastpak et al. [6] relataram que a adição de lignina plastificada em sistemas anodizados reduziu drasticamente a densidade de corrente de corrosão. De forma semelhante, Tan et al. [7] utilizaram esferas de lignina como sistema de liberação controlada de inibidores, aumentando a durabilidade dos filmes protetores em imersão.

Outros pesquisadores também exploraram modificações químicas da lignina com resultados promissores para revestimentos anticorrosivos. Gao et al. (2020) relataram a grifação de lignina kraft com (2,3-epoxypropil)trimetilamônio (EPTAC), resultando em um derivado aniônico que alcançou eficiência de inibição de corrosão de 97,8 % em solução ácida (HCl), comprovada por testes eletroquímicos e análise de isoterma de adsorção [8]. Já uma pesquisa publicada na MDPI por Lara et al. (2021) combinou óleo de linhaça epoxidado (ELO) com 15 % de lignina kraft (LNK) para formular um compósito de dupla cura (UV e térmica), que melhorou a eficiência de inibição da corrosão em 140–380 % quando aplicado sobre aço carbono [9]. No trabalho de Diógenes et al. (2021), a substituição parcial do alcatrão de hulha por lignina kraft acetilada em sistemas epóxi do tipo DGEBA resultou em revestimentos com propriedades anticorrosivas aprimoradas e significativa proteção contra radiação UV. Concentrações de 7,5 % e 15 % de lignina demonstraram desempenho superior em testes eletroquímicos, evidenciando a viabilidade da lignina como aditivo funcional em formulações isentas de alcatrão [10].

Em estudo posterior, os mesmos autores avaliaram o desempenho de revestimentos contendo lignina acetilada por meio de ensaios acelerados de corrosão e EIS. Os resultados confirmaram que formulações com até 15 % de lignina conferem resistência à corrosão comparável a revestimentos comerciais, além de bloqueio total da radiação UV A/B, reforçando seu potencial como componente multifuncional em sistemas epoxídicos [11]. Esses trabalhos reforçam o grande potencial da lignina como aditivo sustentável em revestimentos orgânicos de alto desempenho.

Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo desenvolver, caracterizar e avaliar revestimentos epóxi modificados com lignina, aplicados ao aço carbono, investigando seu desempenho anticorrosivo e sua viabilidade como alternativa sustentável ao DGEBA. Para isso, foram preparadas formulações contendo 1%, 2,5% e 5% (m/m) de lignina, as quais foram submetidas às seguintes etapas: (i) desenvolvimento dos revestimentos, com preparo e aplicação das formulações; (ii) caracterização físico-química, por meio de medidas de ângulo de contato, análise de espessura e ensaios de permeabilidade a íons cloreto; e (iii) avaliação da resistência à corrosão, por exposição à solução salina (NaCl 3,5%) e análises eletroquímicas por EIS. Com base na literatura, espera-se que as formulações contendo lignina apresentem módulo de impedância superior a $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ [9–12], indicando elevada capacidade de proteção.

Além de seu potencial técnico, o uso da lignina em revestimentos epóxi está alinhado às diretrizes de sustentabilidade, contribuindo para a redução da pegada de carbono e promovendo o aproveitamento de subprodutos da biomassa. Trabalhos recentes apontam que sistemas contendo lignina podem ainda apresentar propriedades de autocura, maior resistência à radiação UV e atividade antimicrobiana [4,10,11], ampliando seu apelo como alternativa ecoeficiente para aplicações anticorrosivas.

2 Metodologia

2.1 Preparação dos revestimentos

A Tabela 01 apresenta as quantidades dos reagentes utilizados na preparação de 100 gramas de cada formulação de revestimento epóxi. Inicialmente, a lignina foi dissolvida em acetato de etila sob agitação magnética para garantir uma dispersão homogênea. Em seguida, essa solução foi incorporada à resina epóxi DGEBA e submetida a concentração sob pressão reduzida, visando a remoção parcial do solvente.

O agente de cura utilizado foi a isoforona diamina (IPDA), cuja quantidade foi ajustada com base na massa da resina DGEBA presente na formulação, respeitando a proporção recomendada pelo fabricante de 5:1 (massa de DGEBA: massa de IPDA). Portanto, para a cura das 100 gramas de cada revestimento, a massa de IPDA aplicada corresponde aos valores especificados na Tabela 01.

Tabela 01 - Reagentes usados na preparação dos revestimentos.

Revestimento	Massa de lignina (g)	Massa de DGEBA (g)	Volume de acetato de etila (mL)	Massa de IPDA (g)
--------------	----------------------	--------------------	---------------------------------	-------------------

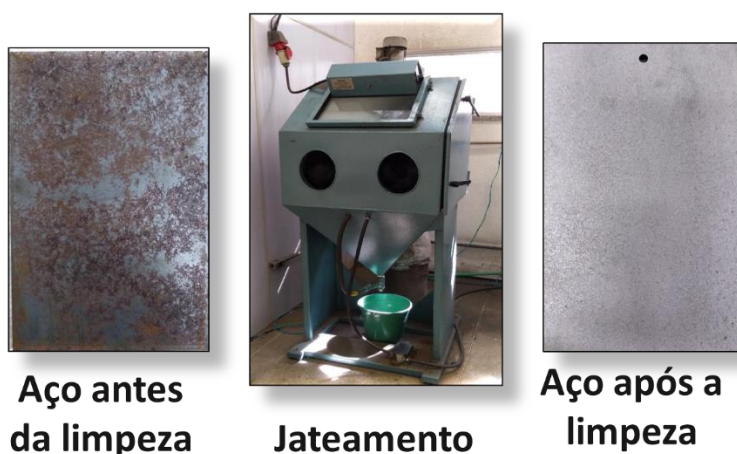
1% lignina	1	99	5	19,8
2,5% lignina	2,5	97,5	12,5	19,5
5% lignina	5	95	25	19

Fonte: Próprios autores (2025).

As chapas de aço carbono SAE 1020 foram submetidas a um processo de limpeza por jateamento abrasivo com granalha de aço, visando à remoção completa dos resíduos de óxido e alcançando o grau de limpeza SA 2 ½ (conforme ilustrado na Figura 01). Em seguida, as amostras passaram por um processo de desengraxe, sendo imersas em acetona para a remoção de contaminantes oleosos e outras impurezas.

Após a limpeza, o perfil de rugosidade superficial das amostras foi avaliado utilizando um medidor digital de rugosidade PosiTector SPG. O valor médio da rugosidade obtido foi de 25,42 μm , com desvio padrão de $\pm 3,55 \mu\text{m}$.

Figura 1: Preparação da superfície metálica.



Fonte: Próprios autores (2025).

2.2 Aplicação dos revestimentos

Para cada ensaio realizado, os revestimentos foram aplicados individualmente em três corpos de prova. A aplicação foi realizada utilizando um extensor de barra quadrangular, garantindo uniformidade na camada depositada. A cura dos revestimentos ocorreu em temperatura ambiente durante 168 horas (7 dias), conforme especificado pelo fabricante. A espessura final média dos revestimentos foi de 189,54 μm , com desvio padrão de $\pm 8,54 \mu\text{m}$.

2.3 Técnicas de Caracterização

2.3.1 Ângulo de Contato

O ângulo de contato da água sobre os revestimentos foi determinado utilizando o equipamento GBX Instrumentation Scientification. Cada tipo de revestimento foi medido em triplicata para garantir a confiabilidade dos dados. As imagens foram capturadas por uma câmera Nikon PixelINK acoplada ao sistema, com exposição breve para evitar alterações no ângulo durante a aquisição.

Este procedimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

2.3.2 Permeação de Íons Na^+ e Cl^-

Este ensaio visa avaliar a capacidade dos revestimentos em impedir a passagem dos íons Na^+ e Cl^- , por meio da medição da condutividade elétrica. Para isso, foi utilizada uma célula dividida em dois compartimentos, interligados por um orifício com diâmetro de 3 cm.

A amostra do filme revestido é posicionada exatamente na junção entre os dois compartimentos da célula. Em um reservatório, é adicionada uma solução aquosa de NaCl a 3,5% (m/v), enquanto no outro é colocada água deionizada. Durante 28 dias, a condutividade da água deionizada foi monitorada diariamente com um medidor específico (modelo 914 pH/Conductometer, Metrohm-Switzerland).

Considerando que a solução salina apresenta condutividade significativamente maior que a água deionizada, qualquer migração de íons do compartimento com solução para o de água deionizada provocará um aumento na condutividade deste último. Assim, este método permite comparar a eficiência dos diferentes revestimentos na barreira contra a permeação de íons Na^+ e Cl^- . Para cada revestimento, foram avaliadas três amostras independentes. Os testes de permeação de íons foram conduzidos no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Ceará.

2.3.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi empregada para avaliar a eficácia dos revestimentos na proteção contra corrosão durante a imersão em solução salina de NaCl a 3,5% (m/v) à temperatura ambiente. As medições foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Ceará, utilizando um potenciostato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT302N, com aquisição de dados pelo software NOVA 2.1. Os testes foram conduzidos em triplicata para cada formulação, considerando o potencial de circuito aberto após 30 minutos de imersão na solução salina.

A célula eletroquímica utilizada continha três eletrodos: (i) Eletrodo de trabalho: substrato de aço carbono revestido com as formulações DGEBA/1% lignina, DGEBA/2,5% lignina e DGEBA/5% lignina; (ii) Eletrodo de referência: Ag/AgCl saturado com Cl^- ; (ii) Contra-eletrodo: malha de platina.

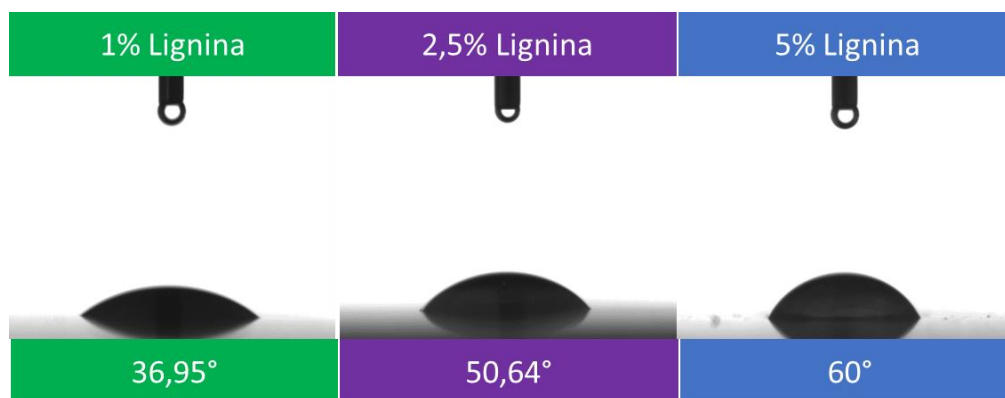
A área do eletrodo de trabalho em contato com o eletrólito foi delimitada pela célula acrílica, correspondendo a $21,2 \text{ cm}^2$. Para a medição, aplicou-se uma perturbação de potencial senoidal de 15 mV, variando a frequência entre 10^5 Hz e $6 \times 10^{-3} \text{ Hz}$.

3 Resultados

3.1 Ângulo de Contato

Os resultados da análise do ângulo de contato indicam que a adição de lignina ao revestimento epóxi promoveu um aumento significativo na hidrofobicidade da superfície, refletido pelo aumento do ângulo de contato. Esse comportamento é altamente desejável, pois maior hidrofobicidade reduz a molhabilidade do revestimento pelo eletrólito, dificultando a penetração de soluções corrosivas e retardando a permeação de íons como Na^+ e Cl^- .

Figura 2: Ângulo de contato dos revestimentos.



Fonte: Próprio autor (2025).

O aumento do ângulo de contato observado com a adição de lignina ao revestimento epóxi está em consonância com estudos recentes que destacam a importância da hidrofobicidade para a melhoria da resistência à corrosão. Superfícies mais hidrofóbicas apresentam menor molhabilidade pelo eletrólito, dificultando a penetração de soluções corrosivas e retardando a difusão de íons agressivos, como Na^+ e Cl^- , através do revestimento.

Zou et al. (2023) investigaram a modificação de revestimentos epóxi com lignina epoxidada, observando que a introdução de grupos epóxi na estrutura da lignina aumentou a hidrofobicidade da superfície, resultando em melhor desempenho anticorrosivo. Os revestimentos modificados apresentaram ângulos de contato

superiores e maior resistência à corrosão em comparação com os revestimentos epóxi não modificados. Esses resultados sugerem que a modificação da lignina pode ser uma estratégia eficaz para melhorar as propriedades de barreira dos revestimentos epóxi [13].

Além disso, Zhou et al. (2022) desenvolveram revestimentos epóxi superhidrofóbicos incorporando nanopartículas de SiO_2 modificadas com perfluorooctiltricloro-silano (PFOTS). Os revestimentos resultantes apresentaram ângulos de contato superiores a 160° , indicando excelente hidrofobicidade. Esses revestimentos exibiram desempenho anticorrosivo aprimorado, com impedância eletroquímica significativamente maior em comparação com revestimentos epóxi convencionais. A combinação de alta hidrofobicidade e propriedades anticorrosivas reforça a importância da modificação da superfície para melhorar a durabilidade dos revestimentos [14].

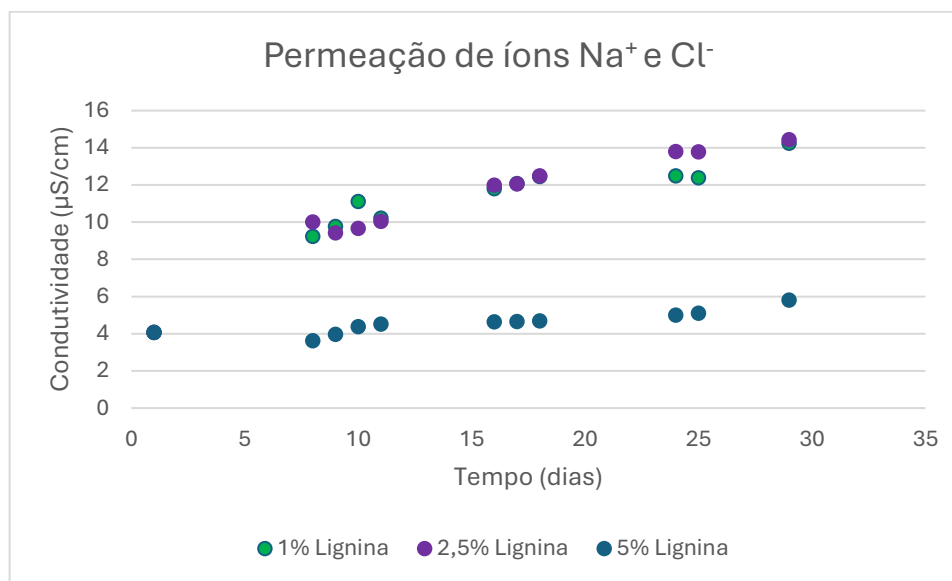
Mais especificamente, o estudo de Diógenes et al. [11] mostrou que a lignina acetilada, quando incorporada em sistemas epóxi, não só melhora a compatibilidade com a matriz polimérica, como também proporciona propriedades hidrofóbicas superiores. Os autores observaram que os revestimentos com lignina modificada apresentaram ângulos de contato aumentados e desempenho anticorrosivo notavelmente superior, com valores de impedância eletroquímica na ordem de $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ após ensaios acelerados. Esses resultados sustentam a viabilidade técnica da lignina como aditivo funcional para reforço da proteção superficial contra corrosão.

Dessa forma, os dados obtidos neste estudo estão em consonância com a literatura atual e evidenciam que a adição de lignina, mesmo em sua forma não modificada, já contribui significativamente para a criação de superfícies menos molháveis, potencializando a ação barreira do revestimento epóxi. Isso reforça o potencial desses materiais como alternativas sustentáveis e eficazes frente aos revestimentos comerciais tradicionais.

3.2. Permeação de Íons

A análise da permeação de íons revelou que o revestimento contendo 5% de lignina apresentou a maior eficácia na contenção da passagem de íons, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Permeação de íons



Fonte: Próprios autores (2025).

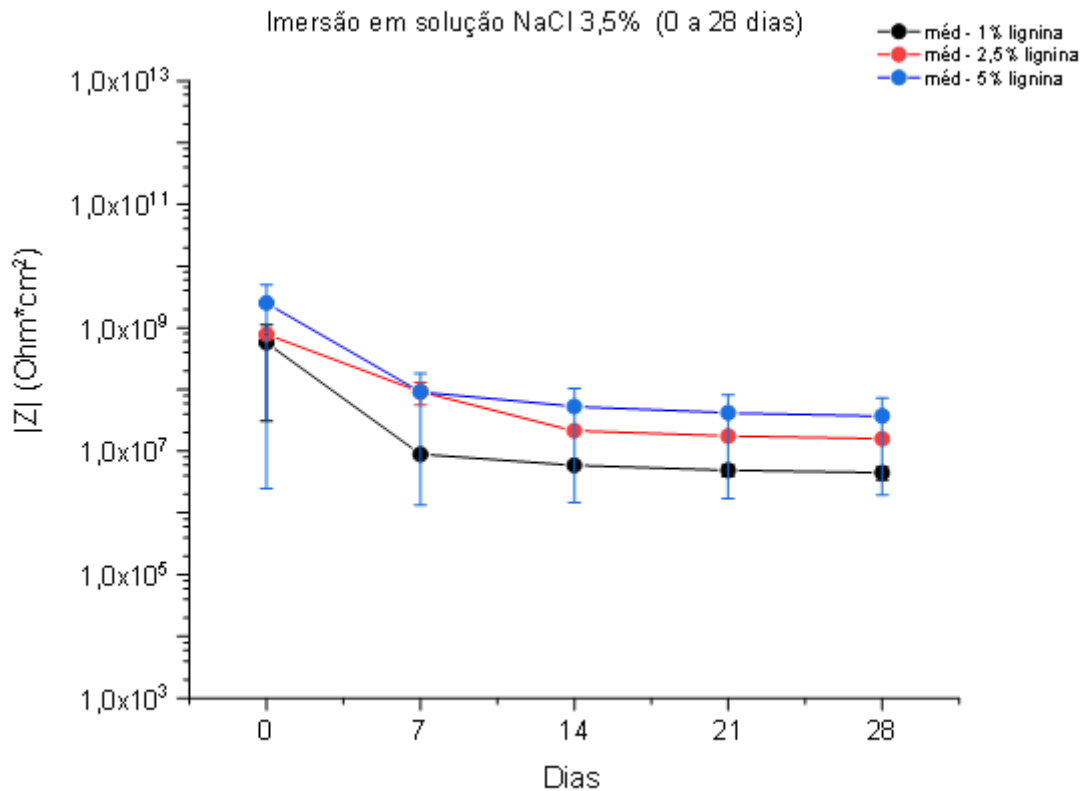
Este desempenho superior é significativo, considerando que a solução salina é um dos principais meios corrosivos para o aço carbono. Estudos recentes corroboram essa observação, indicando que a lignina, devido à sua estrutura polimérica e grupos funcionais, pode atuar como uma barreira eficaz contra a difusão de íons corrosivos.

Por exemplo, Dastpak et al. (2020) demonstraram que revestimentos à base de lignina podem reduzir a densidade de corrente de corrosão de $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ em aço carbono, evidenciando sua capacidade de bloquear a penetração de eletrólitos [12].

3.3 Ensaios Eletroquímicos

Os resultados da espectroscopia de impedância eletroquímica, referentes à variação de $|Z|f=0,006\text{Hz}$ ao longo do tempo de imersão dos revestimentos em solução de NaCl 3,5%, estão mostrados na Figura 4. Os valores finais obtidos estão listados na Tabela 02.

Figura 4: Valores médios de $|Z|f=0,006\text{Hz}$ ao longo do tempo de ensaio de imersão em solução salina.



Fonte: Próprios autores (2025).

Tabela 02 - Valores médios de |Z| em baixa frequência (0,006 Hz) após 28 dias de ensaio de imersão em solução NaCl 3,5%.

Revestimento	Z _{f=0,006} (Ω.cm2)	Desvio Médio
DGEBA	(2,05) × 10 ¹¹	(1,24) × 10 ¹¹
DGEBA/1% Lignina	(4,49) × 10 ⁶	(1,04) × 10 ⁶
DGEBA/2,5% lignina	(1,60) × 10 ⁷	(1,17) × 10 ⁷
DGEBA/5% lignina	(3,73) × 10 ⁷	(3,53) × 10 ⁷

Fonte: Próprios autores (2025).

Na análise eletroquímica inicial, os três revestimentos contendo lignina apresentaram comportamento semelhante, evidenciado por valores de módulo de

impedância $|Z|$ em 0,006 Hz superiores a $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, caracterizando um desempenho adequado na barreira contra corrosão, conforme parâmetros estabelecidos por Amirudin e Thierry (1995) [15]. Durante o período de exposição, foi observada uma redução progressiva nos valores do módulo de impedância em relação à medida inicial, fenômeno esperado diante da exposição prolongada ao ambiente corrosivo. Ao final dos 28 dias de ensaio em solução salina a 3,5% de NaCl, todos os sistemas demonstraram decréscimo nos valores de impedância, sendo que o revestimento à base de DGEBA apresentou a menor variação, mantendo a ordem de magnitude do módulo de impedância na frequência de 6 mHz constante ao longo do teste.

Essa diminuição no módulo de impedância está associada à permeação dos íons cloreto, que promovem a degradação do filme protetor e induzem a formação de produtos de corrosão no substrato metálico, corroborando com os achados de Gad et al. (2023) [16].

Conclusão

O desenvolvimento dos revestimentos epóxi modificados com lignina demonstrou resultados promissores, evidenciando o potencial desse biopolímero como aditivo funcional e sustentável para sistemas de proteção anticorrosiva. Os ensaios de ângulo de contato mostraram que as formulações contendo 2,5% e 5% de lignina apresentaram comportamento marcadamente hidrofóbico, alcançando ângulos médios de $50,64^\circ$ e 60° , respectivamente, o que reforça sua capacidade de reduzir a molhabilidade da superfície e, conseqüentemente, a interação do eletrólito com o revestimento. Em contraste, o revestimento com 1% de lignina apresentou ângulo de contato médio de $36,95^\circ$, indicando menor hidrofobicidade.

Nos ensaios de permeação de íons, observou-se que a formulação com 5% de lignina apresentou o melhor desempenho, limitando a condutividade final da água deionizada a cerca de $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ após 28 dias de ensaio, comprovando sua eficácia superior como barreira física contra a migração de íons Na^+ e Cl^- . De forma complementar, os ensaios eletroquímicos demonstraram que todos os revestimentos contendo lignina mantiveram valores de módulo de impedância superiores a $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ na frequência de 6 mHz após 28 dias de imersão em solução salina, valor considerado satisfatório para revestimentos orgânicos anticorrosivos segundo a literatura.

Esses resultados confirmam que a incorporação de lignina em matrizes epoxídicas não apenas reduz a dependência de componentes petroquímicos, como o DGEBA, mas também contribui positivamente para as propriedades de barreira, hidrofobicidade e resistência eletroquímica. Assim, os sistemas estudados apresentam grande potencial como alternativas parcial ou totalmente renováveis aos revestimentos epóxi convencionais, conciliando bom desempenho anticorrosivo com menor impacto ambiental.

Do ponto de vista de continuidade, recomenda-se avançar para estudos envolvendo:

(i) avaliação da durabilidade em longo prazo, incluindo ensaios acelerados de névoa salina, UV-condensação e ciclos de imersão-secura;

(ii) modelagem eletroquímica para análise de mecanismos de falha e transporte de espécies agressivas no filme;

Em termos de potencial de aplicação, os revestimentos epóxi-lignina avaliados mostram viabilidade para uso em setores como:

- tubulações e tanques de aço carbono na indústria de petróleo e gás, onde há forte exigência por revestimentos de barreira;
- estruturas metálicas expostas a atmosferas marinhas, incluindo infraestrutura portuária;
- equipamentos industriais sujeitos a contato intermitente com eletrólitos;
- sistemas de pintura anticorrosiva ambientalmente amigáveis, alinhados a normas de redução de compostos tóxicos e estímulo ao uso de insumos renováveis.

Desse modo, o presente estudo não apenas comprova a eficácia da lignina como componente funcional de revestimentos epóxi, mas também abre caminho para o desenvolvimento de soluções anticorrosivas mais sustentáveis, economicamente viáveis e alinhadas às demandas industriais por materiais de menor impacto ambiental.

Referências Bibliográficas

1. Bowman, E.; Koch, G.; Varney, J.; Thompson, N.; Moghissi, O.; Gould, M.; Payer, J. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. *NACE International* **2016**, 1–216.
2. Uhlig, H.H.; Revie, R.W. *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Third Edition.*; 1985; ISBN 0471078182.
3. Laurichesse, S.; Avérous, L. Chemical Modification of Lignins: Towards Biobased Polymers. *Prog Polym Sci* **2014**, 39, 1266–1290, doi:10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2013.11.004.
4. Wang, J.; Seidi, F.; Shi, X.; Li, C.; Huang, Y.; Xiao, H. Lignin Self-Healing Coatings Based on Thermo-Reversible Diels-Alder Reaction for Anticorrosion Applications. *Prog Org Coat* **2024**, 191, 108428, doi:10.1016/J.PORGCOAT.2024.108428.
5. Saini, S.; Kardam, S.K.; Kadam, A.A.; Kumar, V.; Gaikwad, K.K. Green and Energy-Efficient Extraction of Cellulose Nano-Fibrils from Rice Straw and Its Coating to Improve Functional Properties of Rice Straw Paperboard Made via Refiner Mechanical Pulping. *Prog Org Coat* **2022**, 165, 106747, doi:10.1016/J.PORGCOAT.2022.106747.
6. Dastpak, A.; Yliniemi, K.; Monteiro, M.C. de O.; Höhn, S.; Virtanen, S.; Lundström, M.; Wilson, B.P. From Waste to Valuable Resource: Lignin as a Sustainable Anti-Corrosion Coating. *Coatings* **2018**, 8, doi:10.3390/COATINGS8120454.

7. Tan, Z.; Wang, S.; Hu, Z.; Chen, W.; Qu, Z.; Xu, C.; Zhang, Q.; Wu, K.; Shi, J.; Lu, M. PH-Responsive Self-Healing Anticorrosion Coating Based on a Lignin Microsphere Encapsulating Inhibitor. *Ind Eng Chem Res* **2020**, 59, 2657–2666, doi:10.1021/acs.iecr.9b05743.
8. Gao, C.; Zhao, X.; Liu, K.; Dong, X.; Wang, S.; Kong, F. Construction of Eco-friendly Corrosion Inhibitor Lignin Derivative with Excellent Corrosion-resistant Behavior in Hydrochloric Acid Solution. *Materials and Corrosion* **2020**, 71, 1903–1912, doi:10.1002/maco.202011799.
9. Komartin, R.S.; Balanuca, B.; Necolau, M.I.; Cojocaru, A.; Stan, R. Composite Materials from Renewable Resources as Sustainable Corrosion Protection Coatings. *Polymers (Basel)* **2021**, 13, 3792, doi:10.3390/polym13213792.
10. Diógenes, O.B.F.; de Oliveira, D.R.; da Silva, L.R.R.; Pereira, Í.G.; Mazzetto, S.E.; Araujo, W.S.; Lomonaco, D. Development of Coal Tar-Free Coatings: Acetylated Lignin as a Bio-Additive for Anticorrosive and UV-Blocking Epoxy Resins. *Prog Org Coat* **2021**, 161, 106533, doi:10.1016/J.PORGCOAT.2021.106533.
11. Diógenes, O.B.F.; de Oliveira, D.R.; da Silva, L.R.R.; Linhares, B.G.; Mazzetto, S.E.; Lomonaco, D.; Araujo, W.S. Acetylated Lignin as a Biocomponent for Epoxy Coating — Anticorrosive Performance Analysis by Accelerated Corrosion Tests. *Surf Coat Technol* **2023**, 474, 130116, doi:10.1016/J.SURFCOAT.2023.130116.
12. Dastpak, A.; Hannula, P.M.; Lundström, M.; Wilson, B.P. A Sustainable Two-Layer Lignin-Anodized Composite Coating for the Corrosion Protection of High-Strength Low-Alloy Steel. *Prog Org Coat* **2020**, 148, 105866, doi:10.1016/j.porgcoat.2020.105866.
13. Zou, S.-L.; Xiao, L.-P.; Li, X.-Y.; Yin, W.-Z.; Sun, R.-C. Lignin-Based Composites with Enhanced Mechanical Properties by Acetone Fractionation and Epoxidation Modification. *iScience* **2023**, 26, 106187, doi:10.1016/j.isci.2023.106187.
14. Zhou, C.; Chen, Q.; Zhao, J.; Wang, S.; Li, J.; Ai, L.; Li, T.; Hu, C. Superhydrophobic Epoxy Resin Coating with Composite Nanostructures for Metal Protection. *Mater Today Commun* **2024**, 38, 107803, doi:10.1016/J.MTCOMM.2023.107803.
15. Amirudin, A.; Thierry, D. IN ORGANIC Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Study the Degradation of Polymer-Coated Metals. **1995**, 9440.
16. Gad, S.M.; Zhou, X.; Lyon, S.B.; Emad, S. Inhibition Mechanism of Anticorrosion Pigments Leached from Organic Coatings: Comparison between Salt Spray and Immersion Testing. *Prog Org Coat* **2023**, 174, 107266, doi:10.1016/j.porgcoat.2022.107266.

Editorial



Editor-chefe:



Vicente de Paulo Augusto de Oliveira Júnior
Centro Universitário Fanor Wyden
vicente.augusto@wyden.edu.br



Editora responsável:



Ozângela de Arruda Silva
Centro Universitário Fanor Wyden
ozangela.arruda@wyden.edu.br

Autor(es):

Otílio Braulio Freire Diógenes  
Centro Universitário Fanor Wyden
202304250537@alunos.unifanor.edu.br
Contribuição: *Investigação, escrita e desenvolvimento do texto.*

Matheus Ferreira de Castro  
Universidade Federal do Ceará
202304250537@alunos.unifanor.edu.br
Contribuição: *Investigação, escrita e desenvolvimento do texto.*

Diego Lomonaco Vasconcelos de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará
202304250537@alunos.unifanor.edu.br
Contribuição: *Investigação, escrita e desenvolvimento do texto.*

Walney Silva Araújo  
Universidade Federal do Ceará
202304250537@alunos.unifanor.edu.br
Contribuição: *Investigação, escrita e desenvolvimento do texto.*

Submetido em: 20.06.2025

Aprovado em: 07.11.2025

Publicado em: 26.12.2025

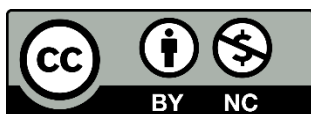
DOI: 10.5281/zenodo.18108345

Financiamento:

Como citar este trabalho:

DIÓGENES, Otílio Braulio Freire; CASTRO, Matheus Ferreira de; OLIVEIRA, Diego Lomonaco Vasconcelos de; ARAUJO, Walney Silva. DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS EPÓXI MODIFICADOS COM LIGNINA PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇO CARBONO. **Duna: Revista Multidisciplinar de Inovação e Práticas de Ensino**, [S. l.], p. 03–17, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.18108345. Disponível em: <https://wyden.periodicoscientificos.com.br/index.php/jornadacientifica/article/view/1023>. Acesso em: 31 dez. 2025. (ABNT)

Diógenes, O. B. F., Castro, M. F. de, Oliveira, D. L. V. de, & Araujo, W. S. (2025). DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS EPÓXI MODIFICADOS COM LIGNINA PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇO CARBONO. *Duna: Revista Multidisciplinar De Inovação E Práticas De Ensino*, 03–17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18108345> (APA)



© 2025 Duna – Revista Multidisciplinar de Inovação e Práticas de Ensino. Centro Universitário Fanor Wyden – UniFanor Wyden. Este trabalho está licenciado sob uma licença *Creative Commons* Atribuição - Não comercial - Compartilhar 4.0 Internacional CC-BY NC 4.0 Internacional).