



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

MATHEUS FERREIRA DE CASTRO

**ESTUDO DE REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS DO TIPO EPÓXI NOVOLAC À
BASE DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DO CAJU**

FORTALEZA – CE

2023

MATHEUS FERREIRA DE CASTRO

ESTUDO DE REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS DO TIPO EPÓXI NOVOLAC À
BASE DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DO CAJU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.
Coorientadora: Dra. Roberta Bastos Vasques.

FORTALEZA – CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C352e Castro, Matheus Ferreira de.

Estudo de revestimentos anticorrosivos do tipo epóxi novolac à base do líquido da casca da castanha do caju / Matheus Ferreira de Castro. – 2023.
43 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

Coorientação: Profa. Dra. Roberta Bastos Vasques.

1. Líquido da casca da castanha do caju. 2. Revestimentos orgânicos. 3. Revestimentos verdes. 4. Proteção contra corrosão. 5. Espectroscopia de impedância eletroquímica. I. Título.

CDD 669

MATHEUS FERREIRA DE CASTRO

ESTUDO DE REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS DO TIPO EPÓXI NOVOLAC À
BASE DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DO CAJU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Otílio Braulio Freire Diógenes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Daniel de Castro Girão
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

À Deus.

A meus pais.

À Universidade Federal do Ceará.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por nunca me abandonar e estar sempre a me guiar.

À minha família, por ser meu alicerce e estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal do Ceará, por me proporcionar todo conhecimento e oportunidade de formação e crescimento profissional.

A todos os professores que fizeram parte da minha graduação que, a seu modo, contribuíram com a minha formação acadêmica.

Ao Professor Doutor Walney Silva Araújo, por todo suporte e orientação para realização deste trabalho.

À Doutora Roberta Bastos Vasques, pela oportunidade e honra de poder estar ao seu lado em um projeto de pesquisa tão engrandecedor e por todo apoio e paciência em me instruir.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão e todos que fazem e fizeram parte da equipe, por terem me acolhido tão bem e por ter sido não só minha porta de entrada para o fascinante mundo da pesquisa científica, como também por ter sido um lugar onde fiz bons amigos.

Ao Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos por todo o apoio para realização desta pesquisa.

À FUNCAP, pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste trabalho.

A todos que fazem parte da banca examinadora, pela atenção, disponibilidade e contribuições.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” Isaac Newton.

RESUMO

Os aços carbono são muito susceptíveis à corrosão das mais diversas formas e pode-se considerar o ambiente marinho um dos meios mais agressivos para esses metais. Visto que se faz necessário buscar meios de impedir ou mesmo atenuar esse fenômeno, estudos sobre a eficiência de revestimentos anticorrosivos foram desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo. Assim, têm-se buscado desenvolver, revestimentos com capacidade de proteção anticorrosiva e que sejam biodegradáveis, os revestimentos ecologicamente amigáveis. Os revestimentos sintetizados a partir do líquido da casca da castanha do caju (LCC), os quais são os revestimentos objeto de estudo deste trabalho que são formulações com adição de 25 %, 50 % e 75 % de LCC (que são as formulações F03, F02 e F01 respectivamente), que são uma dessas alternativas. Como parte da metodologia foram realizados ensaios de exposição atmosférica em ambiente urbano, de imersão em solução salina (NaCl 3,5 %), e ensaios acelerados de corrosão nas câmaras de névoa salina (5 % NaCl) e de umidade saturada, afim de tornar possível o estudo do desempenho de proteção contra a corrosão dos revestimentos à base de LCC e de revestimentos à base de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), em cada condição de degradação considerada para avaliação do desempenho frente a corrosão. O acompanhamento da degradação dos revestimentos foi realizado por meio da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica de modo a obter as respostas em termos de módulo de impedância. Dentre as formulações de LCC analisadas, a que obteve melhores respostas foi a de formulação com 25 % de LCC. Ela demonstrou possuir um desempenho similar ao revestimento à base de DGEBA que é o revestimento referência. Com valores de Módulo de Impedância superiores a $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$, os resultados obtidos mostraram que os revestimentos com LCC apresentaram desempenhos satisfatórios e similares ao revestimento DGEBA em relação à proteção anticorrosiva e exibiram boa capacidade protetiva nos ambientes simulados pelos ensaios de corrosão.

Palavras-chave: Líquido da casca da castanha do caju; Revestimentos verdes; Proteção contra corrosão; Espectroscopia de impedância eletroquímica.

ABSTRACT

Carbon steels are very susceptible to corrosion in the most diverse ways and the marine environment can be considered one of the most aggressive environments for these metals. Since it is necessary to look for ways to prevent or even mitigate this phenomenon, studies on the efficiency of anticorrosive coatings have been developed and improved over time. Thus, efforts have been made to develop coatings with anticorrosive protection capacity and that are biodegradable, ecologically friendly coatings. The coatings synthesized from cashew nut shell liquid (LCC), which are the coatings object of study in this work, are formulations with the addition of 25 %, 50 % and 75 % of LCC (which are the formulations F03, F02 and F01 respectively), which are one of these alternatives. As part of the methodology, atmospheric exposure tests were carried out in an urban environment, immersion in saline solution (3.5 % NaCl), and accelerated corrosion tests in saline mist (5 % NaCl) and saturated humidity chambers, in order to make it possible to study the corrosion protection performance of LCC-based coatings and bisphenol A diglycidyl ether (DGEBA)-based coatings, in each degradation condition considered for the evaluation of performance against corrosion. The monitoring of the degradation of the coatings was carried out using the technique of electrochemical impedance spectroscopy in order to obtain the responses in terms of impedance modulus. Among the LCC formulations analyzed, the one that obtained the best responses was the formulation with 25 % LCC. It has been shown to perform similarly to the DGEBA-based coating which is the reference coating. With Impedance Modulus values greater than $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}^2$, the results obtained showed that the coatings with LCC presented satisfactory and similar performances to the DGEBA coating in terms of anticorrosive protection and exhibited good protective capacity in the environments simulated by the corrosion tests.

Keywords: Cashew nut shell liquid; Green coatings; Corrosion protection; Electrochemical impedance spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Componentes do LCC e propriedades.....	18
Figura 2	– Substrato metálico antes do tratamento superficial	21
Figura 3	– (a) Cabine de jateamento por pressão pertencente ao LPC ; (b) Substrato metálico após jateamento e limpeza com acetona PA	23
Figura 4	– Aplicação do revestimento no substrato metálico.....	24
Figura 5	– Amostra durante o ensaio de imersão salina em solução NaCl 3.5 %.....	25
Figura 6	– Amostras durante ensaio de umidade saturada	26
Figura 7	– Amostras posicionadas para o ensaio de exposição atmosférica na ECA/UFC.....	26
Figura 8	– Amostras posicionadas para o ensaio de névoa salina.....	27
Figura 9	– Célula para análise por espectroscopia de impedância eletroquímica	28
Figura 10	– Etapas para realização do teste Pull Off.	29
Figura 11	– (a) Esquema ilustrativo de realização do teste Pull Off; (b) Esquema ilustrativo com indicação dos tipos de falha e cada interface.....	30
Figura 12	– Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 92 dias de ensaio em imersão salina em solução NaCl 3.5 %, em ($\Omega.cm^2$)	32
Figura 13	– Gráfico de variação do $ Z $ dos revestimentos, em 6 mHz, após 92 dias de imersão salina em solução NaCl 3.5 %, em ($\Omega.cm^2$)	33
Figura 14	– Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 70 dias de ensaio de umidade saturada, em ($\Omega.cm^2$)	34
Figura 15	– Gráfico de variação do $ Z $ dos revestimentos, em 6 mHz, após 70 dias de umidade saturada, em ($\Omega.cm^2$)	35
Figura 16	– Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 42 dias de ensaio de exposição atmosférica, em ($\Omega.cm^2$)	36
Figura 17	– Gráfico de variação do $ Z $ dos revestimentos, em 6 mHz, após 42 dias de exposição atmosférica, em ($\Omega.cm^2$)	37
Figura 18	– Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) de ensaio de nevoa salina, em ($\Omega.cm^2$).....	38
Figura 19	– Gráfico de variação do $ Z $ dos revestimentos, em 6 mHz, após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) em névoa salina, em ($\Omega.cm^2$).....	39
Figura 20	– Médias das forças de aderência (Pull Off).....	40
Figura 21	– Tipos de falhas obtidas por teste de adesão.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem dos componentes em cada formulação.....	22
Tabela 2 - Espessura média dos revestimentos.....	24
Tabela 3 - Classificação dos resultados de $ Z _{f=6 \text{ mHz}}$	31
Tabela 4 - Valores médios de $ Z _{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 92 dias de ensaio de imersão salina em solução NaCl 3,5 %.....	33
Tabela 5 - Valores médios de $ Z _{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 70 dias de ensaio de umidade saturada.....	35
Tabela 6 - Valores médios de $ Z _{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 42 dias de ensaio de exposição atmosférica.....	37
Tabela 7 - Valores médios de $ Z _{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos F01, F02 e F03 após 30 dias e DGEBA após 35 dias de ensaio em nevoa salina, em 6 mHz.....	39
Tabela 8 - Valores médios de adesão por Pull Off.....	40
Tabela 9 - Tipos de falhas obtidas no teste Pull Off.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
UFC	Universidade Federal do Ceará
DGEBA	Éter de Glicidil de Bisfenol A
LCC	Líquido da casca da castanha do caju
ECA	Estação de exposição atmosférica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.2 Objetivo geral.....	15
2.3 Objetivos específicos.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 Corrosão.....	16
3.2 Revestimentos de origem verde ou renováveis.....	17
3.3 Revestimentos à base de LCC	17
4 MATERIAIS	21
4.1 Substrato metálico – Placas de aço carbono SAE 1020	21
4.2 Revestimentos analisados.....	22
5 METODOLOGIA	23
5.1 Tratamento superficial das amostras por jateamento com granalha de aço	23
5.2 Aplicação dos revestimentos	24
5.3 Imersão em solução de NaCl 3,5 %.....	25
5.4 Ensaio de umidade saturada.....	25
5.5 Ensaio de exposição atmosférica	26
5.6 Ensaio de névoa salina com solução NaCl 5%	27
5.7 Espectroscopia de impedância eletroquímica – EIE.....	28
5.8 Teste de adesão (Pull Off)	29
6 RESULTADOS.....	31
6.1 Imersão em solução de NaCl 3,5%	32
6.2 Umidade Saturada	34
6.3 Exposição Atmosférica.....	36
6.4 Névoa Salina	38
6.5 Teste de adesão (Pull Off)	40
7 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um problema estrutural e, a depender de onde esteja presente, pode trazer sérios riscos financeiros, ambientais e humanos.

O custo da corrosão em todo o planeta foi estimado em 2,5 trilhões de dólares americanos o que representa, aproximadamente, 3,4 % do PIB global. Caso métodos de controle e combate à corrosão fossem corretamente aplicados, estima-se que poderiam ter uma economia entre 15 % e 35 % desse custo global proveniente da corrosão [1].

Um exemplo das consequências danosas ocasionadas pela corrosão foi a explosão do esgoto de Guadalajara, no México, em abril de 1992. O trágico incidente além de danificar cerca de 1000 casas e prédios, teve como consequência, também, a morte de mais de 200 pessoas [2].

Para atenuar problemas causados por corrosão são utilizadas algumas metodologias como uso de inibidores de corrosão e revestimentos anticorrosivos. Assim, como citado por NUNES e LOBO, pode-se definir os revestimentos como películas que são aplicadas na superfície metálica cujo objetivo é dificultar o contato da superfície com o meio corrosivo inibindo a degradação do metal, com função de proteção do substrato metálico por método de barreira [4].

De Lima [3] aborda em sua dissertação, ainda, a questão do desenvolvimento e procura por fontes renováveis e biodegradáveis e cita o líquido da castanha do caju (LCC) como insumo, produzido em larga escala no Brasil, o qual, como fonte de Cardanol e derivados, pode ser utilizado a fim de agregar valor a este composto que é considerado subproduto da indústria do caju.

O presente trabalho, portanto, busca estudar a capacidade de proteção de barreira dos revestimentos que contenham LCC em proporções de 25 %, 50 % e 75 %, com o intuito de firmar a utilização deste composto como um insumo alternativo na síntese de resinas alternativas e ambientalmente amigáveis para formulação de revestimentos anticorrosivos.

2. OBJETIVOS

2.2 Objetivo geral

Avaliar as propriedades de resistência a corrosão de revestimentos epoxídicos à base do Líquido da Casca da Castanha do Caju (LCC).

2.3 Objetivos específicos

- ❖ Analisar a capacidade de proteção contra corrosão dos revestimentos orgânicos em estudo ;
- ❖ Acompanhar a degradação do filme de revestimento por meio da técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) após os ensaios de imersão salina, ensaios acelerados de umidade saturada e névoa salina e ensaio de corrosão atmosférica;
- ❖ Avaliar a aderência à tração (ISO 4624) de revestimentos em amostras epóxi, pintadas em chapas de aço carbono, após ensaios de corrosão;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Corrosão

A corrosão é um problema natural e espontâneo enfrentado pela humanidade há séculos. Ela é conceituada de diversas formas de acordo com o autor. Este trabalho traz, a seguir, uma das definições a fim oferecer uma melhor compreensão desse fenômeno:

Em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal. Assim, muitas vezes o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído...isto é, o metal tendendo a retornar a sua condição de estabilidade. [5]

O problema da corrosão traz como consequência danos irreparáveis ao ambiente e à vida além de prejuízos que chegam aos bilhões de dólares anuais na indústria global de dutos de transmissão de óleo e gás. [6]

Os custos da corrosão envolvem perdas de produtos, substituições de peças, estruturas e equipamentos, manutenção e reparo, suporte técnico especializado, seguros e até estoque de peças e equipamentos para reposição. O valor do custo da corrosão nos Estados Unidos, em 1998, foi estimado em 276 bilhões de dólares anuais o que equivale a 3,1% do Produto interno bruto do país [7]. Em 2019, no Brasil, o custo com corrosão chegou a R\$290 bilhões (aproximadamente 4% do PIB). [8]

Pode-se conceituar o processo de corrosão, também, como a formação de um circuito em forma de pilha eletroquímica que é formada por cátodo, ânodo, condutor iônico e condutor eletrônico. Cátodo e ânodo são regiões do substrato metálico onde ocorrem redução e oxidação respectivamente, enquanto que o eletrólito é o meio condutor iônico e o substrato metálico é o condutor eletrônico, de modo que sem um desses componentes a corrosão não ocorre.

Entender o processo de corrosão é imprescindível para se buscar os meios de proteção capazes de mitigá-lo, haja vista não ser possível impedi-lo por completo. Assim, compreende-se que “abrir o circuito da pilha eletroquímica”, ao utilizar uma barreira (revestimento) entre o eletrólito (meio) e o substrato metálico, cria-se uma resistência à transferência de cargas elétricas do sistema eletroquímico de tal modo que se torna possível atenuar a corrosão. É esta função de barreira a principal propriedade protetiva contra a corrosão que se busca com a utilização de revestimentos.

3.2 Revestimentos de origem verde ou renováveis

De acordo com Pal et al [9], os materiais naturais já se tornaram um importante objeto de estudo dos cientistas da área de corrosão. Segundo ele, o extrato aquoso da semente do limão pode ser utilizado como inibidor enquanto que o extrato clorofórmico da semente de limão pode ser utilizado na síntese de revestimentos anticorrosivos cuja eficiência de proteção chega próximo a 98% em meio ácido (HCl).

Revestimentos orgânicos, em geral, são compostos por uma resina como composição principal (como a epóxi ou alquídica) adicionada de pigmentos colorantes, aditivos para secagem, estabilizadores e agentes anticorrosivos.

Segundo Johari et al. [10], uma possibilidade de método ecologicamente correto de combate à corrosão é o revestimento Sol-Gel. Eles citam que, entre suas vantagens estão as características de ser química e termicamente estável, além de ser um revestimento condutor de eletricidade. Acrescenta ainda que, esse tipo de revestimento pode ser aprimorado ao utilizar nanopartículas (como cério-vanádio e nanodiamantes) ou materiais orgânicos mais espessos e flexíveis o que melhora a característica de barreira do revestimento por fechar os poros do Sol-Gel que antes deixavam o substrato exposto.

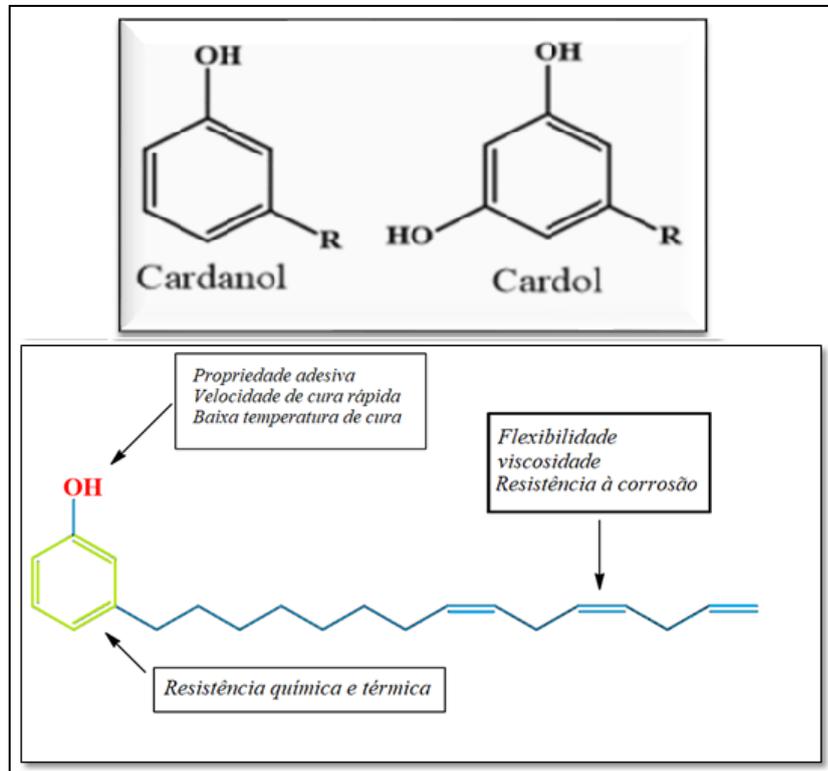
Gao et al. [11] relatam a importância dos revestimentos à base de água, ambientalmente amigáveis, anticorrosivos e inteligentes (com propriedades de autocura). Eles citam os desafios de se fornecer manutenção ou substituição em equipamentos com condições de trabalho agressivas como oleodutos, plataformas offshore e navios, e afirma que estes revestimentos podem ser uma alternativa para reduzir a poluição ambiental ao passo que mantém uma proteção efetiva contra corrosão.

3.3 Revestimentos à base de LCC

O LCC representa aproximadamente 25 % do peso da castanha de caju, o qual por meio de um tratamento térmico industrial sua composição se torna majoritariamente de cardanol e cardol Figura 1 [12].

O líquido da casca da castanha de caju (LCC) é considerado um rejeito industrial. Ele é uma substância barata com alto potencial para ser utilizado como matéria-prima na produção dos revestimentos (resinas epoxídicas) com propriedades anticorrosivas tais como as analisadas neste trabalho.

Figura 1 – Componentes do LCC e propriedades



Fonte: Adaptada de Lucas et al, 2023.

Os compostos presentes no LCC apresentam em suas estruturas três sítios reativos: hidroxila fenólica, anel aromático e uma cadeia longa com 15 átomos de carbono podendo ser saturada ou insaturada (com uma, duas ou três insaturações do tipo cis). Os compostos fenólicos possuem grande poder antioxidante [13]. E a presença da cadeia lateral e de grupo hidroxilas proporcionam propriedades adesivas, velocidade de cura, baixa temperatura de cura, resistência térmica, flexibilidade, viscosidade e resistência à corrosão. [12].

Como reportado por Lucas et al. [12], a produção dessas resinas envolve a utilização de precursores fenólicos de derivados petroquímicos, compostos estes que proporcionam boas propriedades mecânicas. Porém, dentre esses, o bisfenol A é um monômero aromático amplamente utilizado na fabricação de resinas epóxi, como o diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) que é considerado nocivo à saúde humana e ao ambiente pelos efeitos “cancerígenos, mutagênicos e reprotóxicos”.

Ademais, em busca de se reduzir os impactos ambientais provenientes da toxicidade das resinas comerciais de origem dos derivados de petróleo como o DGEBA, tem-

se desenvolvido novas formulações à base de compostos orgânicos biodegradáveis. E é por esta perspectiva que se constata a importância da utilização do líquido da casca da castanha do caju (LCC) como fonte alternativa às resinas epoxídicas à base de DGEBA, além de proporcionar um destino sustentável ao que antes era considerado rejeito para a indústria do caju.

O subproduto da indústria do caju, LCC, é um insumo de baixo custo que pode ser utilizado na fabricação de uma gama de produtos além de ser capaz de substituir o composto fenol nas mais diversas aplicações com resultados equivalentes ou até melhores [12].

O LCC pode ser extraído de 2 maneiras: o LCC natural que pode ser obtido da casca da castanha de caju através de extração por solvente de baixo ponto de ebulição a exemplo do hexano e é constituído basicamente de ácido anacárdico (60 a 65%) e cardol (15 a 20%); e o LCC técnico, que tem origem na indústria de processamento de castanha, que é constituído de cardanol (60 a 65%) e cardol (15 a 20%) [14].

...o óleo negro e viscoso começou a ter maior importância a partir da chamada química verde, pois poderia ser um problema pelo fato de sua composição química não deve ser descartado na natureza. Hoje devida a esse interesse científico temos várias aplicações deste resíduo que vão de larvicida a verniz, passando pelo uso em sensores eletroquímicos, inseticidas e antioxidantes para óleos naftênicos (empregados na indústria petroquímica para reduzir o processo de oxidação), podendo ser aplicado na produção de materiais biologicamente ativos, surfactantes, polímeros e aditivos [14].

Sua principal aplicação é na produção de derivados poliméricos e resinas, considerando seu potencial como possível substituto aos derivados do petróleo. Dentre as principais utilizações desses polímeros destacam-se o uso em resinas de troca iônica, tintas anticorrosivas, materiais à prova d'água, retardantes de chama, no revestimento de superfícies, em materiais de atrito e na modificação de borrachas. Diferente das demais resinas (alta rigidez), as obtidas a partir do LCC são mais maleáveis e mostram maior solubilidade em solventes orgânicos. Outro aspecto interessante é o seu caráter hidrofóbico, o que lhe confere resistência a bases e ácidos [14].

O parque industrial brasileiro com foco na exportação da amêndoa de castanha de caju é formado por 12 empresas, 8 no Ceará, 3 no Rio Grande do Norte e 1 no Piauí, as quais possuem juntas, capacidade de processamento de 360 mil toneladas/ano de castanha que geram 45 mil toneladas de LCC/ano [15].

A não toxicidade é a principal característica do cardanol puro para ser utilizado como matéria prima renovável. O cardol, porém, é um dos constituintes do LCC menos estudados e desperta o interesse da comunidade científica pela sua utilidade como substrato

em síntese orgânica. Ainda que o cardol tenha sido, inicialmente, considerado tóxico, estudos posteriores indicaram uma tolerância de até 5g/Kg em ratos. [15, 16].

4 MATERIAIS

4.1 Substrato metálico – Placas de aço carbono SAE 1020

Para a realização deste trabalho foram utilizadas placas de aço-carbono SAE 1020 cujas as dimensões eram 15 cm x 10 cm x 0,3 cm. Ao comparar o substrato metálico com a norma de padrões de preparo de superfície NBR 7348:2017, é possível inferir que as placas apresentam grau de oxidação B, tal como pode ser observado na Figura 2 [17].

Figura 2 – Substrato metálico antes do tratamento superficial.



Fonte: Autor, 2023.

4.2 Revestimentos analisados

Foram utilizadas 4 formulações, com diferentes concentrações de LCC e DGEBA (revestimento de referência utilizado como base para comparação com as demais formulações).

A síntese da resina epóxi à base do LCC foi realizada no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT) da Universidade Federal do Ceará.

A seguir, a Tabela 1 descreve a porcentagem dos componente para cada formulação.

Tabela 1 – Porcentagem dos componentes em cada formulação.

REVESTIMENTO	LCC (%)	DGEBA (%)
DGEBA	0	100
F01 – 75 % LCC	75	25
F02 – 50 % LCC	50	50
F03 – 25 % LCC	25	75

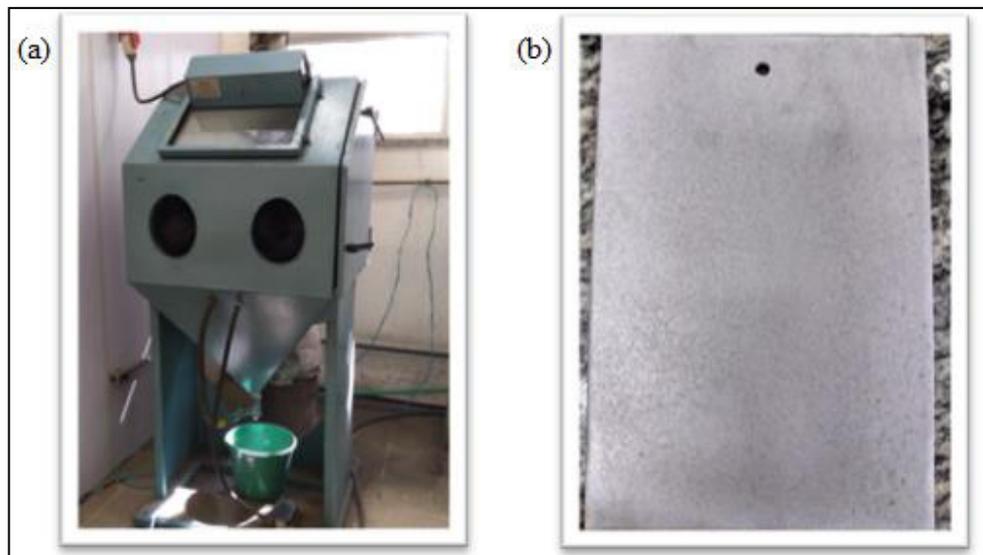
Fonte: Autor, 2023.

5 METODOLOGIA

5.1 Tratamento superficial das amostras por jateamento com granalha de aço

As amostras, como recebidas, ainda oxidadas, passaram pelo processo de tratamento superficial por jateamento abrasivo com granalhas de aço para a retirada das carepas de laminação e produtos de corrosão. Foi obtido uma rugosidade média de 41 micrometros. O equipamento utilizado foi um cabine de jateamento por pressão, na Figura 3 (a), pertencente ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), na Universidade Federal do Ceará. Após o jateamento as amostras foram submetidas a uma limpeza com acetona PA para desengraxe, como indicado na Figura 3 (b), em seguida foram embaladas em plástico filme e guardadas sob vácuo até serem entregues ao Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT) para aplicação dos revestimentos.

Figura 3 – (a) Cabine de jateamento por pressão pertencente ao LPC; (b) Substrato metálico após jateamento e limpeza com acetona PA.



Fonte: Autor, 2023.

5.2 Aplicação dos revestimentos

A aplicação dos revestimentos sobre os substratos metálicos foi realizada com a utilização de um extensor de barra quadrangular 500 – 600 mm. O agente de cura utilizado foi o Isoforonadamina (IPDA) para a cura dos revestimentos, à temperatura ambiente, por um período de 7 dias. A Figura 4 mostra a aplicação do revestimento.

Figura 4 – Aplicação do revestimento no substrato metálico.



Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 2 informa os valores de espessura média de cada revestimento. As medidas foram obtidas por meio da utilização de um instrumento medidor de espessura de revestimentos de modelo PosiTector®6000.

Tabela 2 – Espessura média dos revestimentos.

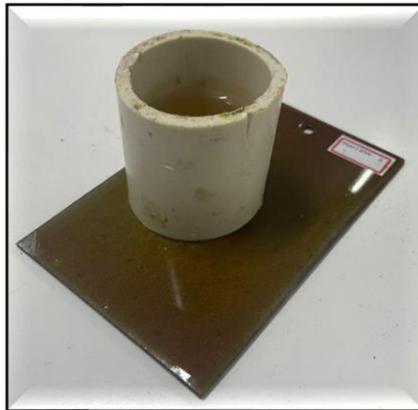
Revestimento	Espessura média (µm)	Desvio Padrão (µm)
DGEBA	335	65
F01 – 75 % LCC	231	69
F02 – 50 % LCC	179	53
F03 – 25 % LCC	258	73

Fonte: Autor, 2023.

5.3 Imersão em solução de NaCl 3,5 %

O ensaio de imersão salina simula o comportamento da amostra revestida em um ambiente marinho totalmente submersa. Ele consistiu em deixar uma solução salina de 3,5 % NaCl dentro de um tubo de PVC, de 5 cm de diâmetro interno, colado diretamente sobre o filme de revestimento nas amostras, conforme ilustrado na Figura 5. Este ensaio teve duração de 92 dias.

Figura 5 – Amostra durante o ensaio de imersão salina em solução NaCl 3.5 %.



Fonte: Autor, 2023.

5.4 Ensaio de umidade saturada

O ensaio acelerado de umidade saturada tem como objetivo simular a exposição da amostra a um ambiente de extrema umidade relativa do ar. Para sua realização foi utilizado uma câmara de modelo BASS-UK-01/2012 do LPC, conforme indicado na Figura 6. A temperatura interna era mantida a $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, conforme a norma ASTM D2247 [18].

O equipamento tinha a água destilada substituída semanalmente. Este ensaio teve duração de 70 dias.

Figura 6 – Amostras durante ensaio de umidade saturada.



Fonte: Autor, 2023.

5.5 Ensaio de exposição atmosférica

O ensaio de exposição atmosférica expõe as amostras em condições reais da atmosfera do ambiente urbano em que a Universidade Federal do Ceará (UFC) está exposta. Este ensaio foi realizado na estação de corrosão atmosférica (ECA) do LPC, na UFC, indicada na Figura 7. Conforme padronizado em ABNT NBR 6209 [19], era borrifada solução 5 % NaCl sobre as amostras em exposição, a cada 7 dias. Este ensaio teve duração de 42 dias.

Figura 7 – Amostras posicionadas para o ensaio de exposição atmosférica na ECA/UFC.



Fonte: Autor, 2023.

5.6 Ensaio de névoa salina com solução NaCl 5%

O ensaio de névoa salina simula um ambiente de alta umidade e salinidade como as regiões expostas à forte maresia dos oceanos. Para a realização deste ensaio foi utilizada uma câmara de modelo Q-FOG/CCT1100 do LPC. As amostras revestidas e devidamente identificadas pelas abraçadeiras tiveram suas laterais e quinas revestidas com fita adesiva protetora antes de serem postas no equipamento de ensaio, conforme mostrado na Figura 8. Durante o ensaio a temperatura interna da câmara era mantida a 35° C, conforme padronizado em ABNT NBR 8094 [20]. Este ensaio acelerado teve duração de 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA).

Figura 8 – Amostras posicionadas para o ensaio de névoa salina.



Fonte: Autor, 2023.

5.7 Espectroscopia de impedância eletroquímica – EIE

A espectroscopia de impedância eletroquímica, se refere à técnica de análise não destrutiva utilizada para acompanhar a degradação do filme de revestimento protetivo aplicado ao substrato metálico, de modo a fornecer informações relevantes referentes à capacidade protetiva contra a corrosão em termos de módulo de impedância ($|Z|$) por frequência e módulo de impedância por tempo de ensaio além de gráficos Nyquist e Bode Fase.

A célula eletroquímica para análise por EIE possui a configuração exposta na Figura 9. Ela é composta pelo substrato metálico, previamente exposto em uma das quinas da amostra revestida (eletrodo de trabalho), pela solução NaCl 3,5 % (eletrólito) em temperatura ambiente, por uma rede de platina (contra eletrodo) e por um eletrodo de Ag/AgCl - 3M (eletrodo de referência) conectados ao potenciostato/galvanostato [autolab] da Metrohm modelo PGSTAT302N que utiliza o software NOVA versão 2.1.6 para aquisição dos dados. A análise consiste em aplicar uma perturbação de 15 mV em uma faixa de frequência que vai de 100 kHz até 6 mHz para obter respostas em Z real e Z imaginário de cada ponto. Todos os ensaios de corrosão foram realizados em duplicata e tiveram suas amostras analisadas por EIE a cada 7 dias.

Figura 9 – Célula para análise por espectroscopia de impedância eletroquímica.



Fonte: Autor, 2023.

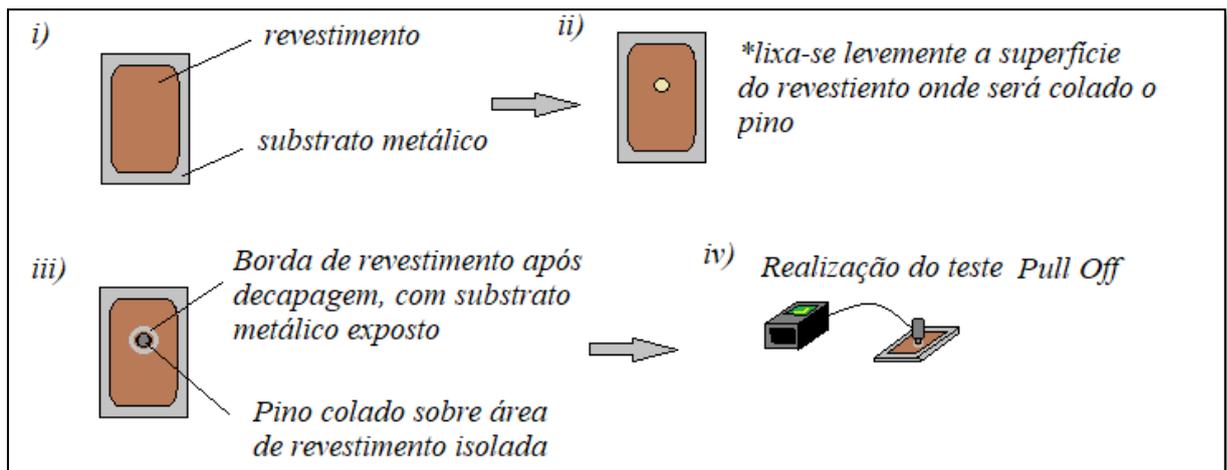
5.8 Teste de adesão (Pull Off)

O Pull Off é um teste em que se busca obter uma medida da capacidade de aderência do revestimento ao substrato metálico (pré-tratado superficialmente), indicada nos valores das medidas de tração e, visualmente na amostra e no pino, o tipo de falha obtida. O teste é normatizado pela ASTM D4541 [21].

O teste de adesão consiste em realizar uma decapagem lateral na borda do pino colado sobre o revestimento para que não haja interferência dessa área (com revestimento) sobre a região onde será aplicada a força de tração. Assim, a região sob tração se mantém isolada do restante do revestimento da amostra para se obter um resultado com mais precisão.

A seguir a Figura 10 mostra o passo a passo para realização do teste de adesão Pull-Off.

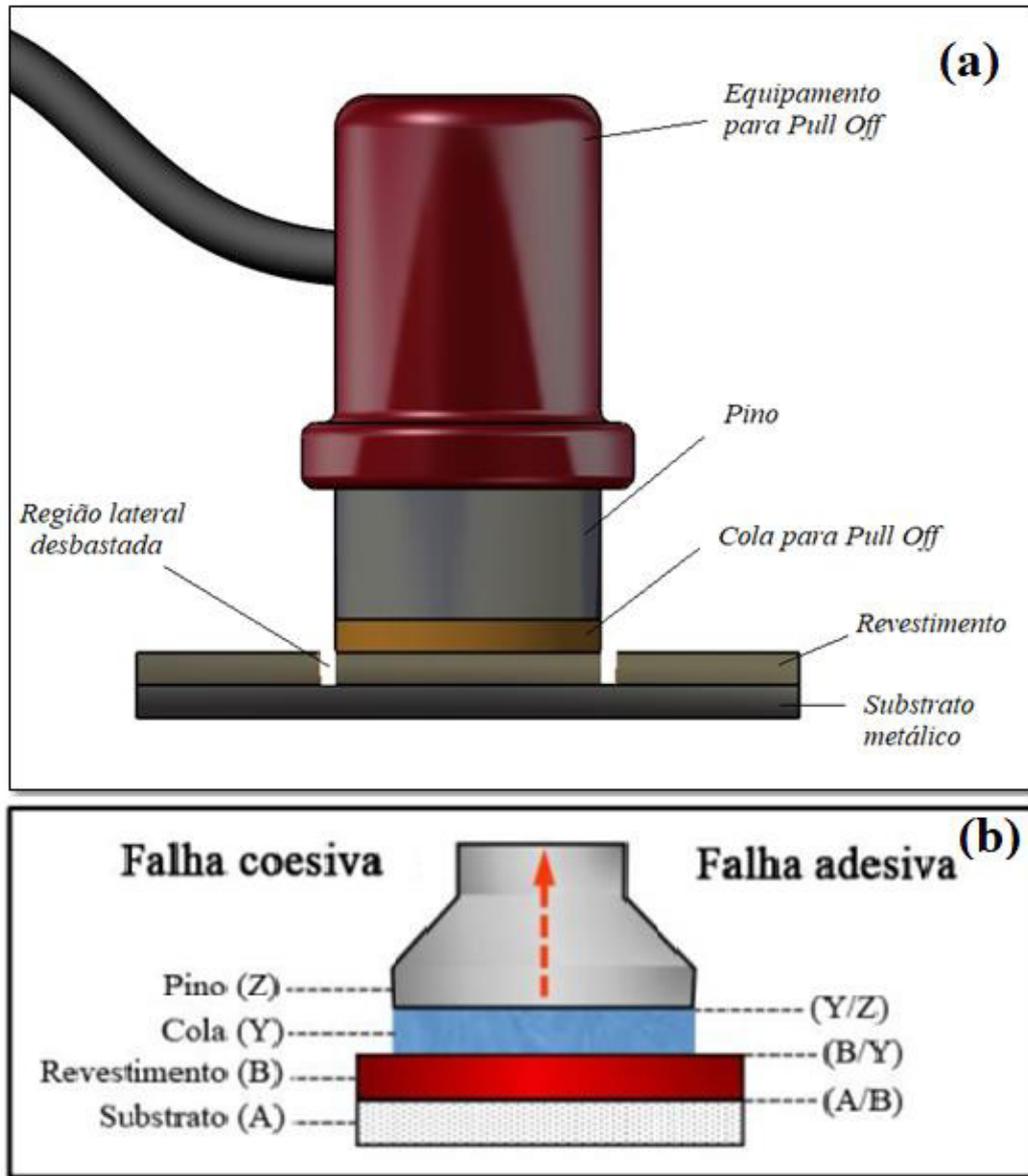
Figura 10 – Etapas para realização do teste Pull Off.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 11 (a) mostra um esquema ilustrativo de realização do teste Pull Off e a Figura 11 (b) informa as interfaces presentes e os tipos de falha possíveis.

Figura 11: (a) Esquema ilustrativo de realização do teste Pull Off; (b) Esquema ilustrativo com indicação dos tipos de falha e cada interface.



Fonte: Adaptado de Lucas et al, 2020.

As falhas coesivas são aquelas em que ocorre o rompimento dentro das camadas dos revestimentos como indicado em (B) e (Y) na Figura 11 (b), enquanto que as falhas denominadas adesivas são aquelas que ocorrem entre as interfaces como em exposto em (A/B), (B/Y) e (Y/Z) da mesma figura.

6 RESULTADOS

Como os revestimentos orgânicos atuam como uma barreira física entre a solução e o substrato, uma perfeita combinação de fatores, incluindo a hidrofobicidade dos reagentes usados na preparação de revestimentos e a alta densidade de reticulação, é necessária para alcançar uma barreira perfeita [22]. Os valores de módulo de impedância na menor frequência (6 mHz) trazem informações sobre o estado de degradação da tinta, e de acordo com a literatura quando este valor é [23]:

Tabela 3: Classificação dos resultados de $|Z|$

Acima de $1 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$	Ótimo/Excelente
Entre $1 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$ e $1 \text{ M}\Omega.\text{cm}^2$	Bom
Abaixo de $1 \text{ M}\Omega.\text{cm}^2$	Fraco

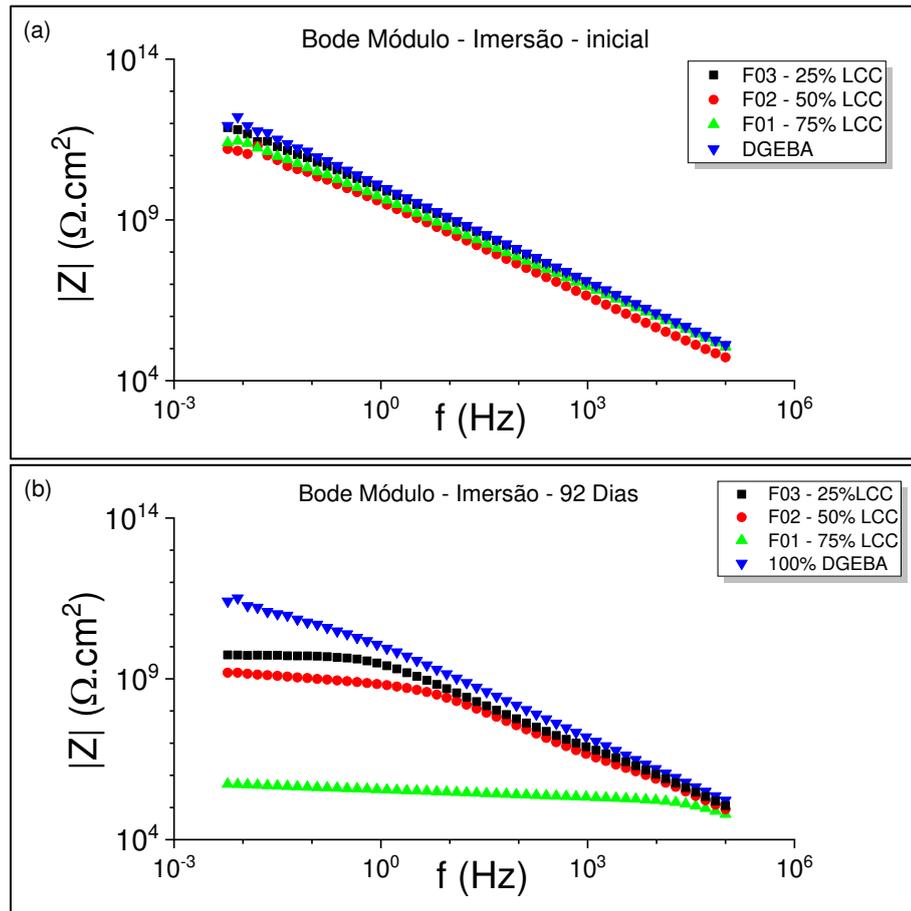
Fonte: Autor, 2023.

A partir dos gráficos de Bode módulo é possível obter informações sobre a resposta da impedância nas regiões de alta frequência (que caracteriza a resistência do eletrólito) e baixa frequência (que caracteriza a resistência do revestimento). O comportamento esperado de um revestimento ideal é de um perfil de capacitor perfeito com altos valores de impedância na menor faixa de frequência [12].

6.1 Imersão em solução de NaCl 3,5%

Os diagramas de bode módulo obtidos antes do ensaio de imersão salina em solução 3,5 % de NaCl e após 92 dias, estão descritos na Figura 12 (a) e (b), respectivamente.

Figura 12 – Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 92 dias de ensaio em imersão salina em solução NaCl 3,5 %, em ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).



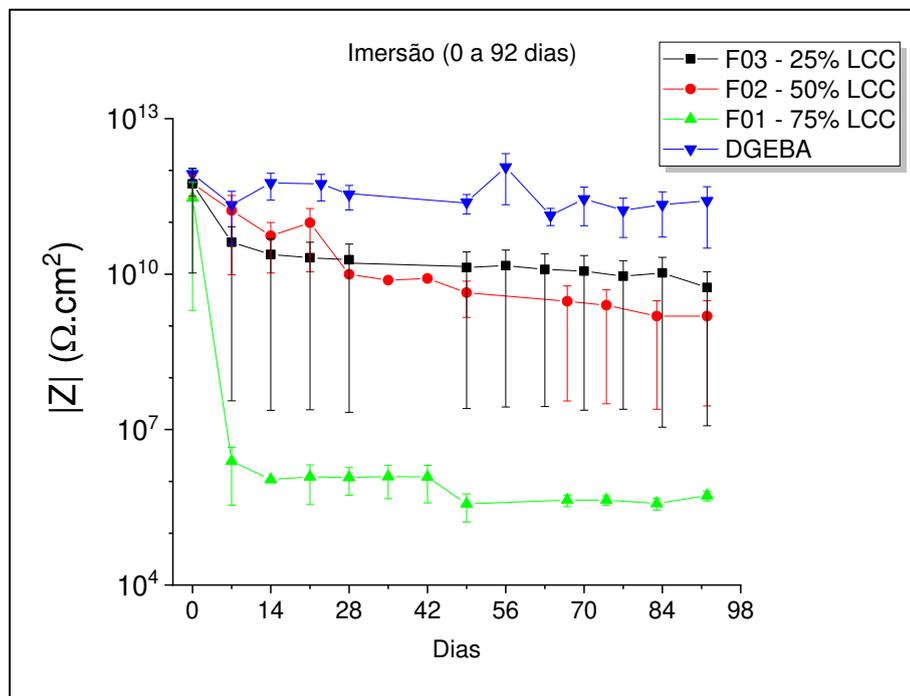
Fonte: Autor, 2023.

A Figura 12(a) apresenta o espectro de impedância de um revestimento típico, o qual não apresenta ataque de corrosão [24]. Na Figura 12(b), os revestimentos de F03 e F02 exibiram uma queda, de 2 e 3 ordens de grandeza respectivamente, nos valores de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ após 92 dias de ensaio, enquanto a formulação com 75 % LCC (F01) teve uma queda mais acentuada, de 6 ordens de grandeza, ao tomar como referência de comparação o estado inicial, indicando a permeação do eletrólito e a difusão dos íons através do revestimento [25]. A formulação 100 % DGEBA não apresentou processo de degradação após o ensaio, mostrando um perfil de capacitor perfeito [12], com altos valores de impedância, onde o caminho de difusão da água e do oxigênio pelo revestimento para o substrato de aço carbono foi diminuído devido ao efeito de barreira proveniente da alta espessura do DBEGA contra

espécies corrosivas [26].

Na Figura 13, a seguir, é possível observar a variação dos valores dos módulos de impedância (em $\Omega \cdot \text{cm}^2$), na menor frequência (6 mHz), para cada formulação durante os 92 dias de ensaio de corrosão em imersão em solução salina. A F03 e a F02 obtiveram valores semelhantes de proteção contra corrosão, os quais são classificados como excelentes [23]. Tal comportamento está relacionado pelo alinhamento da propriedade antioxidante do LCC e da boa propriedade de barreira do DGEBA [13].

Figura 13 – Gráfico de variação do $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 92 dias de imersão salina em solução NaCl 3,5 %, em ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).



Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 4, a seguir, expõe os valores de resistência obtidos no último ponto, de frequência 6 mHz, para todas as formulações analisadas.

Tabela 4 – Valores médios de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 92 dias ensaio de imersão salina em solução NaCl 3,5 %.

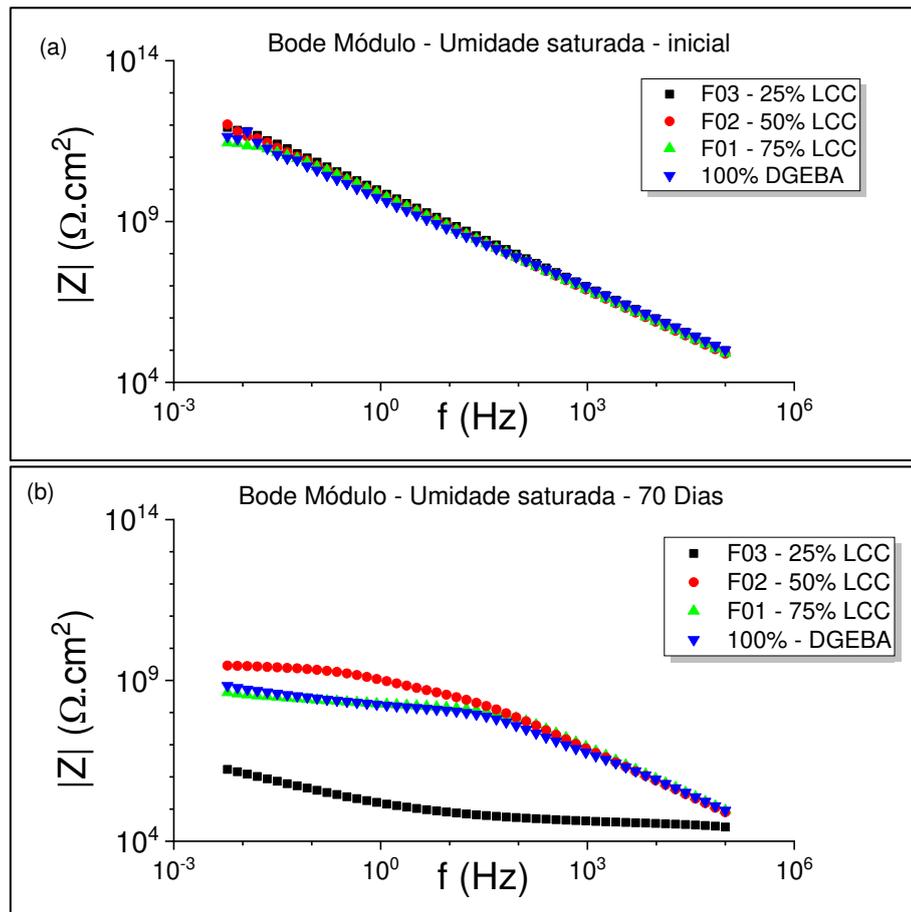
Ensaio	Duração (dias)	$ Z $ em ($\text{G}\Omega \cdot \text{cm}^2$), no ponto de frequência de 6 mHz			
		25% LCC	50% LCC	75% LCC	100% DGEBA
Imersão – NaCl 3,5%	0	73,8	558	295	859
	92	5,54	1,54	0,533M	259

Fonte: Autor, 2023.

6.2 Umidade Saturada

Os diagramas de bode módulo obtidos antes do ensaio de umidade saturada e após 70 dias, estão descritos na Figura 14 (a) e (b) respectivamente.

Figura 14 – Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 70 dias de ensaio de umidade saturada, em ($\Omega.cm^2$).



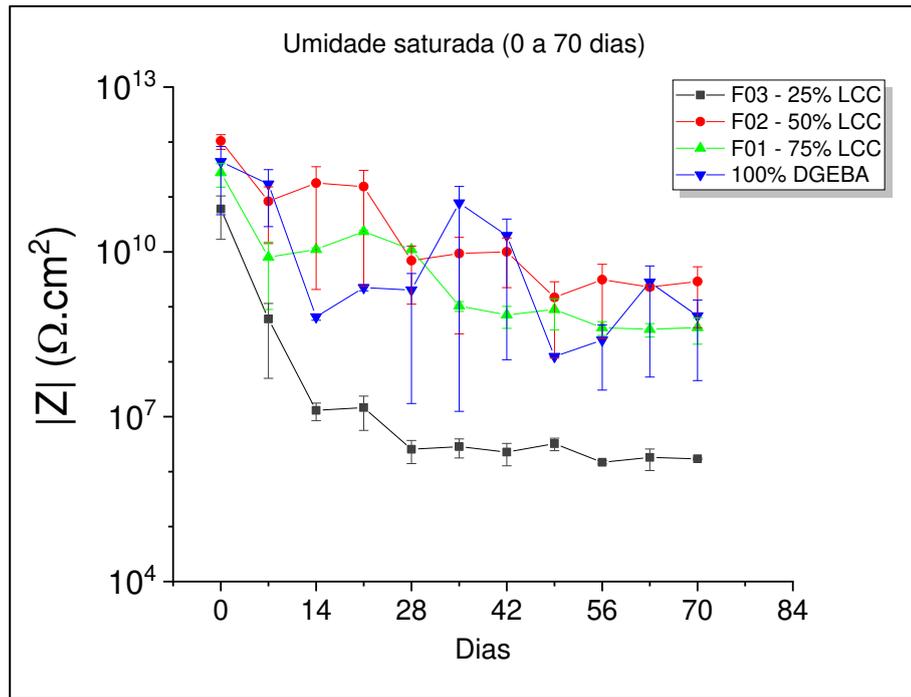
Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 14(a) todos os revestimentos apresentaram comportamento inicial capacitivo não indicando nenhum processo de degradação dos filmes [12]. Todavia, na Figura 14(b), é possível observar que as formulações F01, F02 e 100 % DGEBA apresentaram uma queda no módulo de impedância o que aponta um comportamento resistivo típico de processos corrosivos [12]. A formulação F03 apresentou a queda mais acentuada do módulo de impedância, com valor médio de $1,71 M\Omega.cm^2$, indicando uma acentuada permeação do eletrólito através do revestimento o que pode ser um indicador da degradação do revestimento e do ataque corrosivo sob o filme [25].

A Figura 15 expõe, para cada formulação, a variação dos valores dos módulos de

impedância (em $\Omega.cm^2$), na menor frequência (6 mHz), durante o período de 70 dias de ensaio. É possível observar que ao longo dos 70 dias de ensaio em câmara de umidade saturada, os revestimentos F01, F02 e 100 % DGEBA se mantiveram dentro da mesma margem de erro com resultados semelhantes de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ e classificados como ótimos revestimentos orgânicos com boa propriedade de barreira [23, 26].

Figura 15 – Gráfico de variação do $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 70 dias de umidade saturada, em ($\Omega*cm^2$).



Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 5, a seguir, expõe os valores de resistência obtidos no último ponto, de frequência 6 mHz, para todas as formulações analisadas.

Tabela 5 – Valores médios de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 70 dias de ensaio de umidade saturada.

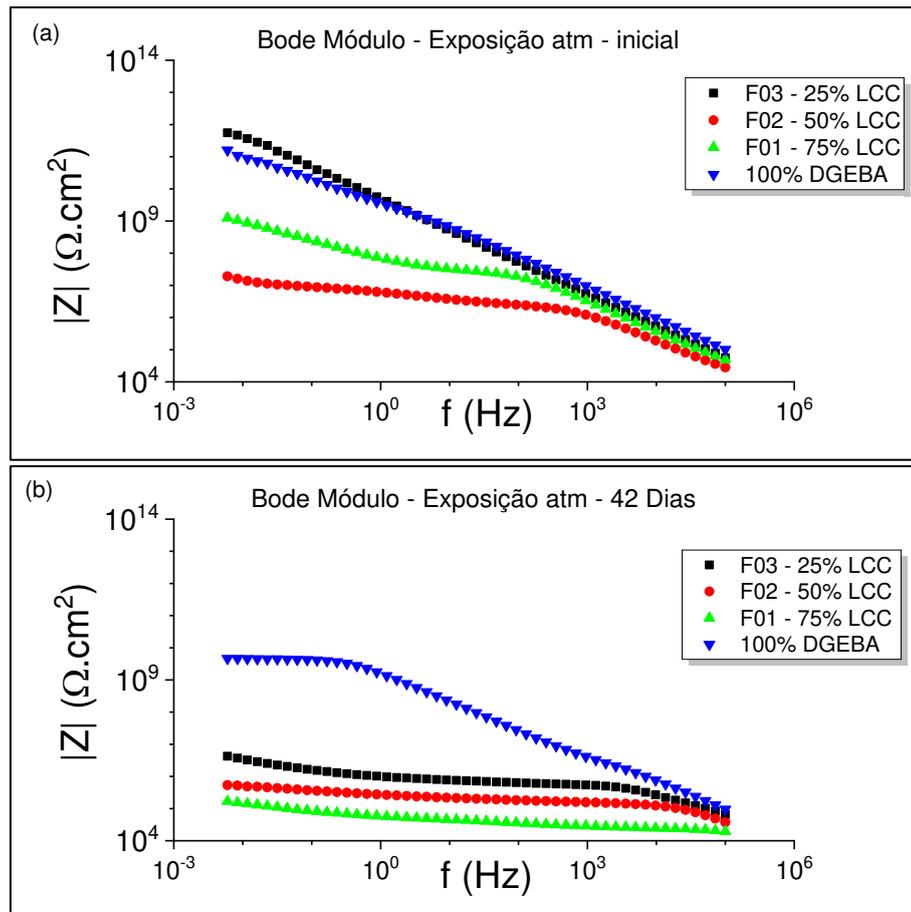
Ensaio	Duração (dias)	$ Z $ em ($G\Omega.cm^2$), no ponto de frequência de 6 mHz			
		25% LCC	50% LCC	75% LCC	100% DGEBA
Umidade saturada	0	56,9	1050	278	439
	70	1,71M	2,89	0,42	0,69

Fonte: Autor, 2023

6.3 Exposição Atmosférica

Os diagramas de bode módulo obtidos antes do ensaio de exposição atmosférica e após 42 dias de ensaio estão descritos na Figura 16 (a) e (b) respectivamente.

Figura 16 – Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 42 dias de ensaio de exposição atmosférica, em ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).



Fonte: Autor, 2023.

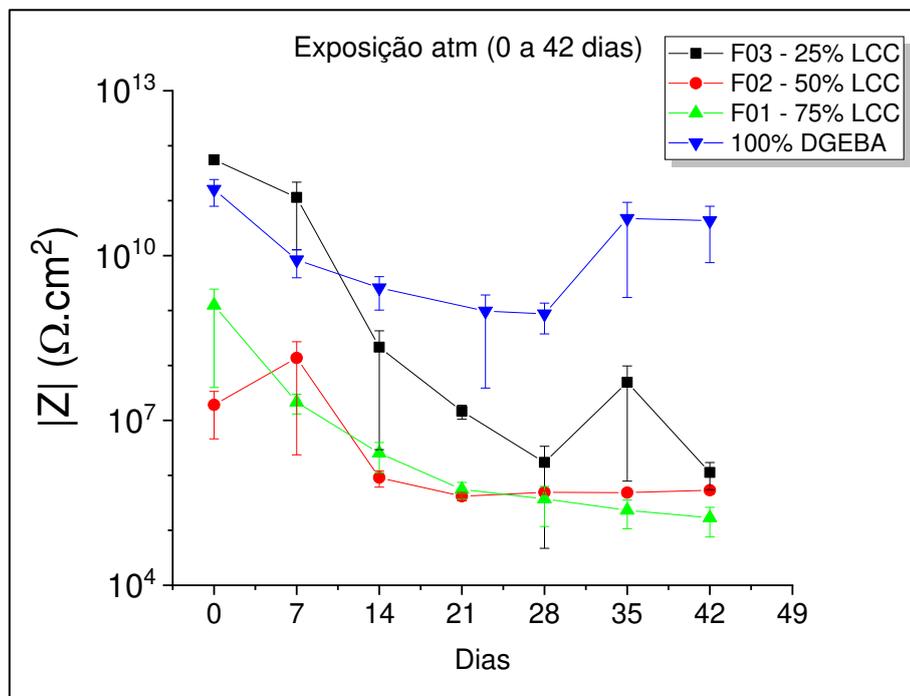
Como apontam as Figura 16(a) e 16(b), após o período de ensaio, as 3 formulações com adição de LCC apresentaram quedas acentuadas nos módulos de impedância (em relação aos valores iniciais), o que indica que houve degradação dos filmes de revestimentos causados pelo ataque de corrosão da atmosfera local sobre as amostras expostas [12].

A Figura 16(b) expõe o comportamento resistivo das 3 formulações com adição de LCC em uma ampla faixa de frequência, o que é característico de uma baixa resistência à corrosão, devido a absorção do eletrólito pelo revestimento que cria caminhos de contato com o metal base [12]. No entanto, o revestimento referência, 100 % DGEBA, apresentou um

resultado superior na ordem de $1 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$, após os 42 dias de ensaio, que pode ser associado à alta espessura e baixa porosidade que são características de uma barreira perfeita [12].

A seguir, a Figura 17 expõe, para cada formulação, a variação dos valores dos módulos de impedância (em $\Omega.\text{cm}^2$) na menor frequência (6 mHz) durante os 42 dias de ensaio de exposição atmosférica. O revestimento F03 iniciou com valor próximo ao 100 % DGEBA, no entanto, após 28 dias de ensaio de corrosão, o $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dessa formulação cai para valores próximos de F02 e F01 e estabiliza. Ademais, as três formulações, após o período de ensaio, obtiveram resultados semelhantes e satisfatórios de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$, classificadas como bons revestimentos orgânicos anticorrosivos [23].

Figura 17 – Gráfico de variação do $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 42 dias de exposição atmosférica, em ($\Omega.\text{cm}^2$).



Fonte: Autor, 2023.

A tabela 6, a seguir, expõe os valores de resistência obtidos no último ponto, de frequência 6 mHz, para todas as formulações analisadas.

Tabela 6 – Valores médios de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 42 dias de ensaio de exposição atmosférica.

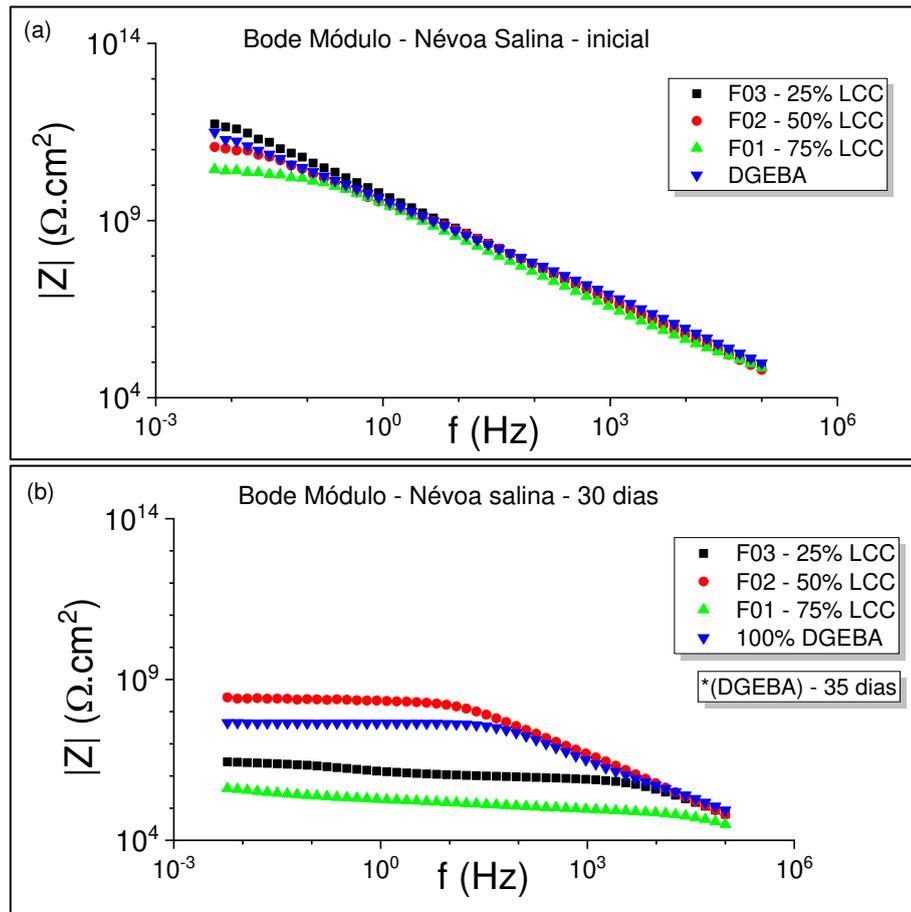
Ensaio	Duração (dias)	$ Z $ em ($\text{G}\Omega.\text{cm}^2$), no ponto de frequência de 6 mHz			
		25% LCC	50% LCC	75% LCC	100% DGEBA
Exposição atmosférica	0	554	19,2M	1,25	161
	42	1,13M	0,537M	0,169M	43,3

Fonte: Autor, 2023.

6.4 Névoa Salina

Os diagramas de bode módulo obtidos antes de realizar o ensaio de nevoa salina e após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) de ensaio, estão descritos na Figura 18 (a) e (b) respectivamente.

Figura 18 – Diagramas de Bode Módulo: (a) inicial e (b) após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) de ensaio de nevoa salina, em ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).



Fonte: Autor, 2023.

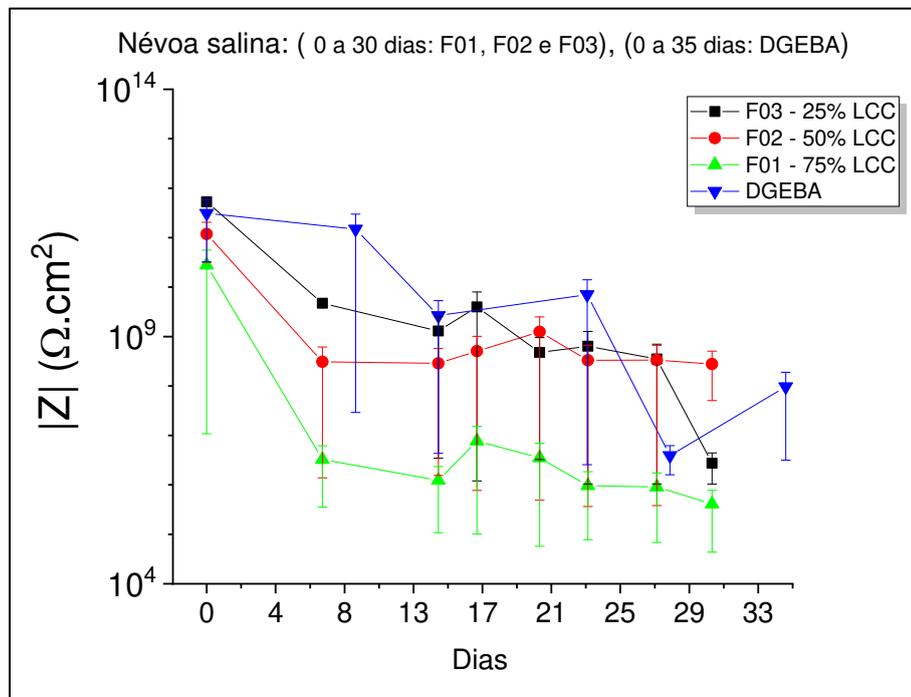
A Figura 18(a) mostra como, inicialmente, todos os revestimentos apresentaram resposta capacitiva. No entanto, a Figura 18(b) revela que, após o período de ensaio, todos os revestimentos tiveram uma queda acentuada do $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$, apresentando comportamento resistivo o que pode indicar uma permeação do eletrólito e o processo de degradação do revestimento [12, 25]. Outrossim, é importante salientar que a resistência do revestimento é diretamente dependente de sua porosidade, esta que tende a aumentar à medida que o revestimento envelhece [27].

Vale destacar que formulação F02 foi a que obteve melhor resposta no ensaio de

corrosão em névoa salina, sendo classificado como um bom revestimento de propriedade anticorrosiva, com $|Z|_{f=6 \text{ mHz}} = 0,278 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$ [23].

A Figura 19 expõe a variação dos módulos de impedância $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ para cada uma das formulações, após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) de ensaio em câmara de névoa salina. Como é possível observar na mesma figura, todas as formulações, incluindo a de referência, apresentaram quedas acentuadas de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$, após o período de ensaio, o que indica que houve degradação do revestimento e passagem do eletrólito até o substrato metálico [12].

Figura 19 – Gráfico de variação do $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos, em 6 mHz, após 30 dias (F01, F02 e F03) e 35 dias (DGEBA) em névoa salina, em $(\Omega.\text{cm}^2)$.



Fonte: Autor, 2023.

A tabela 7, a seguir, expõe os valores de resistência obtidos no último ponto, de frequência 6 mHz, para todas as formulações analisadas.

Tabela 7 – Valores médios de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ dos revestimentos F01, F02 e F03 após 30 dias e DGEBA após 35 dias de ensaio em nevoa salina, em 6 mHz.

Ensaio	Duração (dias)	$ Z _{f=6 \text{ mHz}}$ em $(\text{G}\Omega.\text{cm}^2)$, no ponto de frequência de 6 mHz			
		25% LCC	50% LCC	75% LCC	100% DGEBA
Névoa salina	0	531	118	27,8	310
	30	2,74M	278M	8,70M	-
	35	-	-	-	96,6M

Fonte: Autor, 2023.

6.5 Teste de adesão (Pull Off)

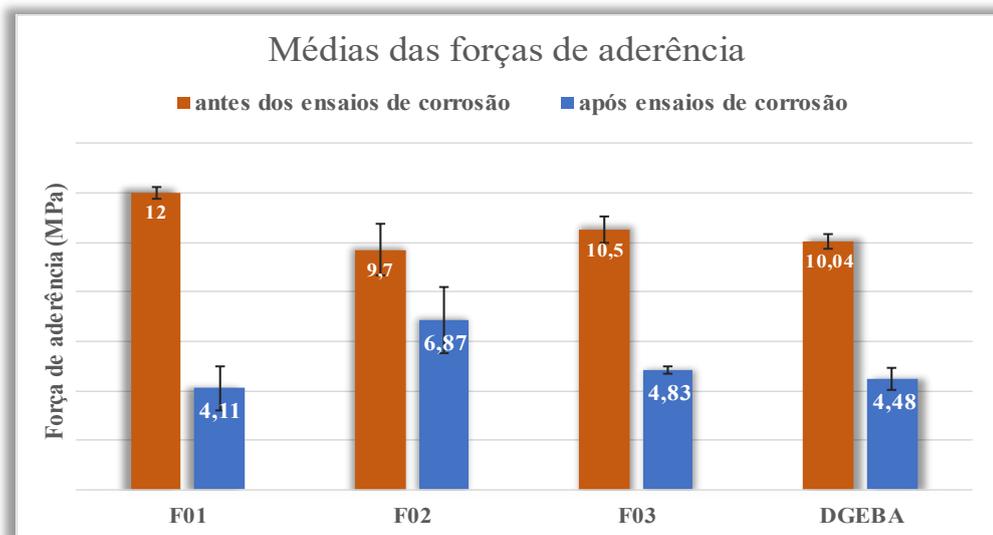
Os valores médios da força de tração obtidos no teste Pull Off para as quatro formulações, antes e após o fim de cada ensaio de corrosão, estão expostas na Tabela 8 e na Figura 20 a seguir.

Tabela 8 – Valores médios de adesão por Pull Off

<i>Teste de adesão (Pull Off)</i>				
Ensaio	75 % LCC – F01 (MPa)	50 % LCC – F02 (MPa)	25 % LCC – F03 (MPa)	100 % DGEBA (MPa)
Antes dos ensaios de corrosão	12,0±0,22	9,70±1,05	10,50±0,52	10,04±0,29
Imersão salina	1,84 ± 0,16	7,215 ± 1,07	4,63 ± 0,38	3,56 ± 0,08
Umidade saturada	3,06 ± 0,18	4,21 ± 0,63	4,78 ± 0,44	4,73 ± 0,66
Névoa salina	3,64 ± 0,09	7,52 ± 2,19	5,00 ± 0,43	5,12 ± 0,32
Exposição atmosférica	7,90 ± 0,67	8,55 ± 1,20	4,92 ± 2,01	4,52 ± 0,22
Valor médio da força, após ensaios de corrosão:	4,11 ± 0,90	6,87 ± 1,33	4,83 ± 0,13	4,48 ± 0,46

Fonte: Autor, 2023.

Figura 20 – Médias das forças de aderência (Pull Off)



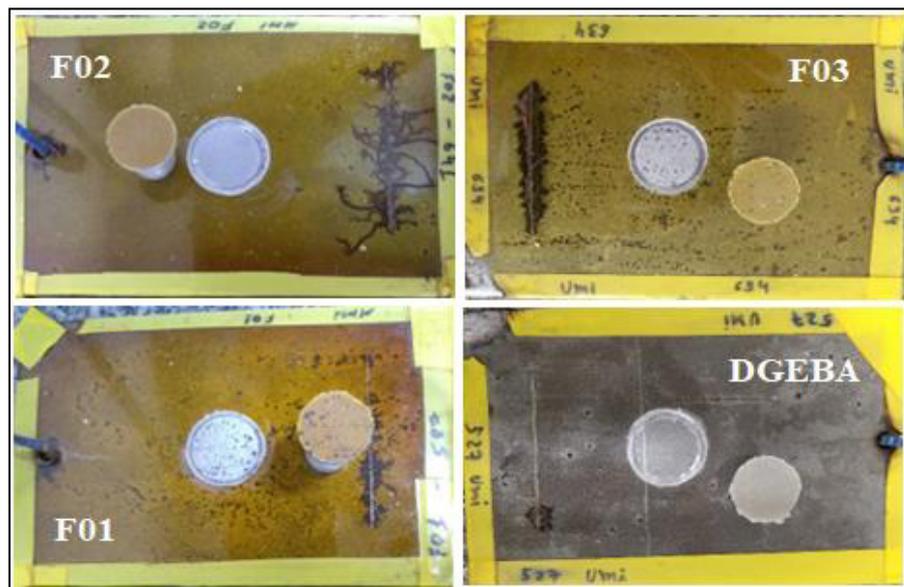
Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 20 é possível observar que as três formulações estudadas apresentaram resultado geral de resistência a tração satisfatória quando comparada com a 100 % DGEBA, variando de 9,7 MPa a 12 MPa. Levando em consideração a média global após os ensaios de corrosão, os revestimentos de formulação 50 % LCC (F02) e 25 % LCC, foram os que apresentaram maiores valores no teste de aderência com um resultado de 6,87 MPa e 4,83 MPa de força de tração aplicada respectivamente.

Os resultados obtidos pelo teste ensaio de método Pull Off corroboram com os resultados eletroquímicos já apresentados, haja vista que as formulações com LCC apresentaram boas propriedades adesivas e de resistência à tração ao passo que apresentaram, também, boas propriedades anticorrosivas [12].

A seguir, na Figura 21 é possível observar um exemplo de tipo de falha ocasionada ao realizar este teste de adesão que é a falha do tipo adesiva.

Figura 21 – Tipos de falha obtidas por teste de adesão



Fonte: Autor, 2023.

As falhas adesivas, em que ocorre a separação completa nas interfaces, com altos valores de força de adesão, são indicadores muito bons de força de adesão, pois apontam que a adesão entre o revestimento e substrato é muito forte e que o revestimento tem alta resistência à ruptura coesiva [28].

A Tabela 9, a seguir, expõe o tipo falha predominante obtidos com o teste Pull Off em cada um dos revestimentos (em todas as duplicatas), antes e após seus respectivos ensaios de corrosão. O LCC demonstrou ter uma boa resistência à tração, haja vista a falha

predominante ter sido adesiva com bons valores de força de adesão e ter obtido falhas coesivas apenas após os ensaios exposição atmosférica.

Tabela 9 – Tipos de falhas obtidas no teste Pull Off

Amostra	Antes dos ensaios de corrosão	Imersão Salina		Umidade Saturada		Exposição Atmosférica		Névoa Salina	
		1	2	1	2	1	2	1	2
F 01	Coesiva (C)	Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)		Coesiva (B)		-	Adesiva (A/B)
F 02	Coesiva (C)	Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)	Adesiva (B/C)	Adesiva (A/B)	
F 03	Coesiva (C)	Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)	
100 % DGEBA	Coesiva (C)	Adesiva (A/B)		Adesiva (A/B)		Adesiva (B/C)		Adesiva (A/B)	

Fonte: Autor, 2023.

7 CONCLUSÃO

- Para o ensaio de Imersão Salina a formulação F03 obteve melhor desempenho na propriedade de proteção contra corrosão ($|Z|_{f=6 \text{ mHz}} = 5,54 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$), ao tomar como referência a formulação 100 % DGEBA.
- Para o ensaio de Umidade Saturada a formulação F01 e F02 obtiveram resultados muito bons e semelhantes, com valores de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ superiores a $10^8 \Omega.\text{cm}^2$.
- No ensaio de Exposição Atmosférica a formulação F03 obteve um bom resultado com valor médio de $1,36 \text{ M}\Omega.\text{cm}^2$ de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$. As demais formulações com LCC apresentaram avançado processo de degradação do filme e redução na propriedade de barreira, o que refletiu na queda dos valores de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ e que também pode indicar que o filme de revestimento se tornou mais permeável à passagem do eletrólito.
- No ensaio de Névoa Salina as formulações F02 e F03 obtiveram bons resultados com valores de $|Z|_{f=6 \text{ mHz}}$ superiores a $10^8 \Omega.\text{cm}^2$ e $10^6 \Omega.\text{cm}^2$, respectivamente, enquanto a formulação F01 apontou um maior processo de degradação do revestimento e redução na propriedade de barreira.
- O Teste de adesão (Pull Off) mostrou que a formulação F02 obteve o maior valor médio de força de resistência à tração (6,87 MPa) após ensaios de corrosão. Adicionalmente, para os resultados antes dos ensaios de corrosão, os valores foram muito próximos ao revestimento referência (100%DBEBA).

Os resultados obtidos dos ensaios de corrosão indicaram que dentre os revestimentos anticorrosivos estudados, a formulação F02 apresentou o melhor desempenho de barreira e de força de aderência. Portanto, demonstrando ser um revestimento orgânico viável e promissor, com redução da utilização de resinas comerciais e de agentes de cura (IPDA), diminuindo também os compostos tóxicos.

REFERÊNCIAS

1. EL-SHERIK, A. M. (Ed.). **Trends in oil and gas corrosion research and technologies: Production and transmission**. Woodhead Publishing, 2017.
2. HISTORY. Sewers explode in Guadalajara, Mexico, killing hundreds. History.com Editors, 13 de novembro de 2009. Disponível em: <<https://www.history.com/this-day-in-history/sewers-explode-in-guadalajara>>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.
3. LIMA, Daniele Rodrigues de. Avaliação do desempenho anticorrosivo do revestimento de polibenzoxazina sintetizada a partir do líquido da castanha de caju. 2017.
4. NUNES, L. P.; LOBO, A. C. O. Pintura industrial na proteção anticorrosiva. 5. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2014.
5. GENTIL, V. Corrosão (3 Edição ed.). **Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA**, 1996.
6. WANG, Z. B.; PANG, L.; ZHENG, Y. G. A review on under-deposit corrosion of pipelines in oil and gas fields: testing methods, corrosion mechanisms and mitigation strategies. **Corrosion Communications**, 2022.
7. KOCH, Gerhardus H. et al. Cost of corrosion in the United States. In: **Handbook of environmental degradation of materials**. William Andrew Publishing, 2005. p. 3-24.
8. Cantor, Beatriz de Brito et al. **Processos de Corrosão em Estruturas Metálicas: Medidas de Prevenção e Reparo**. Disponível em: <https://iosrjen.org/Papers/vol11_issue12/A1112010107.pdf>. Acesso em: 13/07/2023.
9. PAL, Shweta et al. Lemon seeds as green coating material for mitigation of mild steel corrosion in acid media: molecular dynamics simulations, quantum chemical calculations and electrochemical studies. **Journal of Molecular Liquids**, v. 316, p. 113797, 2020.
10. JOHARI, N. A. et al. Anti-corrosive coatings of magnesium: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, p. 1842-1848, 2022.
11. GAO, Xiang et al. In situ pretreatment and self-healing smart anti-corrosion coating prepared through eco-friendly water-base epoxy resin combined with non-toxic chelating agents decorated biomass porous carbon. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121920, 2020.
12. DA SILVA, Lucas Renan Rocha et al. Development of BPA-free anticorrosive epoxy coatings from agroindustrial waste. **Progress in Organic Coatings**, v. 139, p. 105449, 2020.
13. CITÓ, AMDGL et al. Antioxidant properties and chemical composition of technical Cashew Nut Shell Liquid (tCNSL). *Food Chemistry*, v. 126, p. 1044-1048, 2011.
14. FERNANDES, Antonia Karine Mesquita; DE SOUSA, Francisco Otaviano Águiar. LCC.
15. MAZZETTO, Selma Elaine; LOMONACO, Diego; MELE, Giuseppe. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Química nova**, v. 32, p. 732-741, 2009.
16. SURESH, M.; RAJ, R. Kaleysa. Cardol: the antifilarial principle from *Anacardium occidentale*. **Current Science**, p. 477-479, 1990.
17. NBR7348 DE 04/2017 - Pintura industrial - Preparação de superfície de aço com jateamento abrasivo ou hidrojateamento.

18. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM International. ASTM D 2247: Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100 % Relative Humidity. West Conshohocken, 2020.
19. ABNT NBR 6209 DE 05/2007 – Corrosão atmosférica – Materiais metálicos – Ensaio não acelerado.
20. ABNT NBR 8094 DE 03/2023 – Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à nevoa salina.
21. ASTM D4541, 2022 Edition, July 1, 2022 - Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.
22. WAZARKAR, Kunal; SABNIS, Anagha. Cardanol based anhydride curing agent for epoxy coatings. **Progress in Organic Coatings**, v. 118, p. 9-21, 2018..
23. AMIRUDIN, A.; THIENY, D. Application of electrochemical impedance spectroscopy to study the degradation of polymer-coated metals. **Progress in organic coatings**, v. 26, n. 1, p. 1-28, 1995.
24. GRUNDMEIER, Guido; SCHMIDT, Wolfgang; STRATMANN, M. J. E. A. Corrosion protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation. **Electrochimica Acta**, v. 45, n. 15-16, p. 2515-2533, 2000.
25. DEFLORIAN, Flavio; ROSSI, Stefano; FEDEL, Michele. Organic coatings degradation: Comparison between natural and artificial weathering. **Corrosion Science**, v. 50, n. 8, p. 2360-2366, 2008.
26. VERMA, Anu et al. Use of waste to wealth process derived sustainable silica-rich graphene analogues to provide enhanced corrosion resistance properties for coatings on carbon steel, exposed to marine environments. **Surface and Coatings Technology**, v. 464, p. 129420, 2023.
27. GIRÃO, Daniel de Castro. Estudo de revestimentos anticorrosivos epóxi-fosfato de zinco com adição de argilas montmorilonitas: aplicação em usina termelétrica. 2019.
28. Coltro, Leda. Fatores que afetam a adesão em laminados. Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, Vol. 8, nº3. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v8n3/v8n3_artigo1.pdf. Acesso em: 26 de julho de 2023.