

Corrosão atmosférica do bronze sob condições climáticas tropicais: estudo de revestimentos anticorrosivos em chapas de bronze para a preservação do patrimônio material



Atmospheric corrosion of bronze under tropical climatic conditions: study of anti-corrosion coatings on bronze sheets for the preservation of material heritage

Camila Broska Elias 

Fatec Praia Grande
cbroskaelias@gmail.com

Vinicius Bianchi Soares 

Fatec Praia Grande
vinicius.engquim@gmail.com

Revista Processando o Saber

eISSN 2179-5150 · Vol 18, n. 01, 2026
Multidisciplinar · DOI · Revisão por pares

Faculdade de Tecnologia Praia Grande – FATEC

Periodicidade: Anual
revista@fatecpg.edu.br

Recebido: Jan 2026

Aceito: Mar 2026

Publicado: Jun 2026

URL: <https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/437>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20028272>



ABSTRACT

This study investigated the atmospheric corrosion of bronze under tropical climate conditions, focusing on the evaluation of anticorrosive coatings applied to bronze sheets. The experiment simulated an environment with high humidity and corrosive agents using a salt spray chamber to expose the sheets to these conditions. Sheets coated with different types of varnishes were analyzed for mass variation and surface integrity over 14 days of exposure. The results showed that the acrylic resin-based coating was the most effective in protecting against corrosion, while other varnishes tested showed lower efficiency, with coating failures that allowed moisture penetration and accelerated the corrosion process. The uncoated sheet suffered a more intense corrosion process, highlighting the importance of protective barriers in tropical climates. This study contributes to understanding the preservation of bronze and provides insights for developing more effective anticorrosive coatings for the conservation of material heritage in tropical regions.

KEY-WORDS: *atmospheric corrosion, bronze, anticorrosive coatings.*

RESUMO

Este estudo investigou a corrosão atmosférica do bronze sob condições climáticas tropicais, com foco na avaliação de revestimentos anticorrosivos aplicados a chapas de bronze. O experimento simulou um ambiente com alta umidade e agentes corrosivos, utilizando uma câmara de névoa salina para expor as chapas a essas condições. Chapas revestidas com diferentes tipos de vernizes foram analisadas quanto à variação de massa e integridade superficial ao longo de 14 dias. Os resultados mostraram que o revestimento baseado em resina acrílica foi o mais eficaz na proteção contra a corrosão, enquanto outros vernizes testados apresentaram menor eficiência, com falhas no revestimento que permitiram a penetração de umidade e aceleraram o processo corrosivo. A chapa sem revestimento sofreu um processo de corrosão mais intenso, destacando a importância de barreiras protetoras em climas tropicais. O estudo contribui para o entendimento sobre a preservação do bronze e oferece subsídios para o desenvolvimento de revestimentos anticorrosivos mais eficazes para a conservação de patrimônio material em regiões com clima tropical.

PALAVRAS-CHAVE: corrosão atmosférica, bronze, revestimentos anticorrosivos.

INTRODUÇÃO

O cobre, um dos primeiros metais explorados pela humanidade desde o período Neolítico, há cerca de dez mil anos, desempenhou um papel fundamental na história das civilizações. A invenção do bronze, uma liga de cobre e estanho, marcou um avanço tecnológico e cultural significativo (Scott, 2002). Entretanto, a preservação de objetos de bronze enfrenta desafios substanciais devido à corrosão, um processo químico complexo que exige um conhecimento aprofundado para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação.

No Brasil, a diversidade climática, caracterizada por altas temperaturas e elevados índices de umidade, apresenta dificuldades adicionais para a conservação do patrimônio em bronze. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2026), o clima predominante em grande parte do território brasileiro é tropical, caracterizado por elevadas temperaturas médias e altos índices de umidade relativa do ar.

O clima tropical pode acelerar a deterioração desses artefatos, tornando imprescindível o uso de revestimentos adequados. Tais revestimentos não apenas mitigam os danos causados pela exposição atmosférica e pela umidade, mas também podem preservar a estrutura e a estética das esculturas de bronze ao longo do tempo. Assim, a conservação física e a integridade histórica e cultural desses artefatos são de extrema importância.

Para isso, foi realizado um experimento laboratorial que simula condições de corrosão atmosférica, permitindo observar o desempenho dos revestimentos e identificar as soluções mais adequadas para proteção do bronze em ambientes externos.

A pesquisa focou, especificamente, na análise comparativa do desempenho desses revestimentos em condições controladas, correlacionando a eficácia de cada material com as condições simuladas de névoa salina e sua resistência à corrosão. Dessa forma, espera-se contribuir com informações relevantes para a preservação de bens culturais em bronze, oferecendo alternativas de conservação mais eficazes e alinhadas com as necessidades dos patrimônios em clima tropical.

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de diferentes revestimentos anticorrosivos aplicados a chapas de bronze, submetidas a condições simuladas de névoa salina, visando identificar os revestimentos mais eficazes para a preservação do material em ambientes de clima tropical.

1. PRESERVAÇÃO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

A conservação de monumentos históricos e obras de arte é uma atividade de grande importância cultural e social, pois esses bens representam o patrimônio material de uma sociedade, funcionando como documentos tangíveis de sua história e contribuindo para o aprofundamento do conhecimento e a perpetuação de sua identidade cultural. No Brasil, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), vinculado ao Ministério da Cultura, é o órgão responsável por assegurar a preservação desses bens, com o objetivo de proteger e promover o patrimônio cultural, garantindo sua transmissão às gerações futuras.

O IPHAN exerce um papel essencial na conservação dos bens culturais do país, incluindo aqueles que foram reconhecidos pela UNESCO nas Listas do Patrimônio Mundial e do Patrimônio Cultural Imaterial da Humanidade. Suas ações são orientadas por convenções internacionais, como a Convenção do Patrimônio Mundial (1972) e a Convenção para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural Imaterial, de 2003 (IPHAN, 2020). A preservação de esculturas e monumentos históricos, que muitas vezes são feitos de ligas metálicas e ficam expostos a condições climáticas adversas, enfrenta desafios consideráveis devido à corrosão provocada pelos agentes atmosféricos, que pode prejudicar tanto a estrutura quanto a aparência dessas obras ao longo do tempo.

A crescente poluição nos centros urbanos intensifica ainda mais a necessidade de preservação, pois o acúmulo de substâncias corrosivas no ambiente ameaça à integridade de metais expostos, abrangendo desde estruturas de edifícios até monumentos históricos e obras de arte. Desde o século XIX, quando observações em cidades como Berlim e Munique revelaram os primeiros sinais dos efeitos da poluição no patrimônio material (Weil, 1980), pesquisadores têm procurado novas estratégias de conservação para conter o processo de deterioração causado pela atmosfera.

No Brasil, a Constituição de 1988 estabelece a proteção do patrimônio cultural, abrangendo tanto bens materiais quanto imateriais. Para garantir essa preservação, são previstos mecanismos legais como o registro, inventário e tombamento, que têm como objetivo proteger os bens culturais de danos e destruição, assegurando sua continuidade ao longo do tempo.

Assim, a preservação de artefatos de bronze configura-se como um compromisso com a memória e a identidade nacional. Ao proteger essas peças, garantimos que as futuras gerações possam continuar a aprender com nossa história e se inspirar na diversidade e riqueza do nosso patrimônio.

2. PROPRIEDADES DO BRONZE

O bronze é uma liga metálica composta principalmente por cobre e estanho (8-10% de estanho), podendo também conter outros elementos em proporções menores. Ambos os metais são obtidos a partir de minérios, com o cobre extraído da calcopirita e o estanho principalmente da cassiterita (Gentil, 2018). Ambos possuem estruturas cristalinas similares e tamanhos atômicos próximos, facilitando a formação de uma solução sólida quando misturados em proporções adequadas. Essa solução sólida é estável e homogênea, conferindo ao bronze propriedades mecânicas superiores, como: maior dureza, resistência à tração e resistência à corrosão, em comparação ao cobre puro (Callister, 2002).

As ligas de bronze são classificadas de acordo com sua composição química e propriedades específicas, com base nas normas SAE J461 e SAE J462, estabelecidas pela *Society of Automotive Engineers* (SAE). Essas normas fornecem diretrizes para as ligas de cobre e seus derivados, como o bronze, especificando as proporções de elementos como cobre, estanho, alumínio, fósforo e níquel. A definição precisa dessas proporções é importante para determinar as propriedades mecânicas das ligas, como resistência ao desgaste, à corrosão e à tração, assegurando que as mesmas atendam aos requisitos de diferentes aplicações. As normas SAE J461 e SAE J462 são utilizadas tanto em processos industriais quanto em projetos culturais e históricos, garantindo que as ligas de bronze possuam as características adequadas para suas diversas funções, incluindo a fabricação de componentes mecânicos e monumentos.

Tabela 1: comparação de ligas de bronze para aplicações em monumentos (Baseado nas Normas SAE J461 e SAE J462)

Liga de Bronze	Composição Principal	Resistência à Corrosão	Aplicações Comuns	Características Estéticas
C83600 (Bronze Fosforoso)	85-90% Cobre, 5-7% Estanho, Fósforo	Boa resistência em ambientes menos agressivos	Equipamentos, rolamentos, aplicações gerais	Pode formar uma patina, mas menos esteticamente atraente para monumentos
Bronze 90/10 (Bronze com 90% Cobre e 10% Estanho)	90% Cobre, 10% Estanho	Excelente resistência à corrosão em ambientes agressivos	Monumentos, esculturas, obras públicas, medalhas	Forma uma patina verde (córrego), apreciada esteticamente ao longo do tempo
Bronze 92/8 (Bronze de alta pureza)	92% Cobre, 8% Estanho	Alta resistência à corrosão	Monumentos, peças artísticas e culturais	Desenvolve uma patina esteticamente agradável ao longo do tempo
Bronze 88/12 (Bronze com 88% Cobre e 12% Estanho)	88% Cobre, 12% Estanho	Boa resistência à corrosão em ambientes moderados	Peças decorativas, elementos arquitetônicos	Desenvolve uma patina moderada, pode ser menos resistente em ambientes extremos
Bronze 85/15 (Bronze com 85% Cobre e 15% Estanho)	85% Cobre, 15% Estanho	Resistente a corrosão em ambientes secos e controlados	Esculturas, detalhes arquitetônicos	Patina menos pronunciada, mais brilho e tonalidade dourada
Bronze 80/20 (Bronze com 80% Cobre e 20% Estanho)	80% Cobre, 20% Estanho	Moderada resistência à corrosão	Aplicações em interiores e peças de menor exposição ao ambiente	Apresenta coloração mais clara, menor resistência à intempéries

Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Além disso, a compatibilidade eletroquímica entre o cobre e o estanho, resultante de suas posições relativamente próximas na série eletroquímica, assegura que não ocorram reações adversas significativas entre os dois metais quando expostos a ambientes corrosivos. Essa característica minimiza a formação de pares galvânicos, que poderiam acelerar processos corrosivos, contribuindo para a durabilidade e estabilidade do bronze ao longo do tempo.

Essas características fazem do bronze um material amplamente utilizado em monumentos históricos e outros artefatos culturais, valorizados por sua resistência, estética e facilidade de moldagem. Apesar disso, em ambientes tropicais, o material pode sofrer maiores desafios devido à combinação de fatores como alta umidade, temperaturas elevadas e a presença de poluentes atmosféricos, que intensificam os processos corrosivos. Por isso, compreender as propriedades específicas das ligas de bronze utilizadas, bem como seus comportamentos em diferentes condições, é essencial para sua preservação e durabilidade.

Quando exposto, o bronze desenvolve naturalmente uma camada superficial conhecida como pátina, ao longo do tempo, devido à interação com a atmosfera e às condições climáticas. Essa camada é predominantemente composta por carbonatos de cobre, óxidos e outros compostos formados pela reação do bronze com elementos como oxigênio, dióxido de carbono e umidade do ar. A formação da pátina é um processo gradual, variando em cor e textura conforme as condições ambientais locais (Scott, 2002).

Compreender essas características torna possível não apenas proteger o bronze de processos corrosivos mais severos, mas também garantir sua conservação em aplicações culturais e históricas.

3. CORROSÃO ATMOSFÉRICA

3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A corrosão atmosférica é um processo dinâmico e complexo, influenciado por múltiplos fatores ambientais e químicos que se desencadeiam quando o metal é exposto ao ambiente. Apesar das características protetivas da pátina do bronze, em climas tropicais, onde há alta umidade e temperaturas elevadas, a eficácia dessa camada pode ser reduzida. Inicialmente, o bronze desenvolve uma camada de óxidos na superfície, que em algumas condições pode proporcionar certa proteção. Entretanto, em climas tropicais, o contato frequente com vapor de água e contaminantes atmosféricos, como dióxido de enxofre e partículas salinas, intensifica a degradação do metal (Gentil, 2018).

Esses fatores são amplificados em regiões costeiras, onde a névoa salina, rica em sais, acelera o processo de corrosão, criando uma sobrecarga nos mecanismos naturais de proteção do bronze (Scott, 2002). Além disso, a exposição prolongada ao sol em áreas tropicais eleva a temperatura das superfícies, o que pode acelerar as reações corrosivas (Ramanathan, 1997).

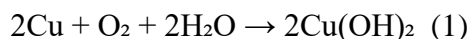
A composição do bronze, que geralmente confere boa resistência a condições ambientais normais, passa a se tornar um fator vulnerável em ambientes tropicais. A pátina formada não consegue se manter estável diante da umidade elevada e dos contaminantes atmosféricos, resultando em um processo de corrosão acelerado, evidenciado pela formação de produtos de corrosão mais espessos e menos homogêneos (Callister, 2002). Assim, as propriedades iniciais do bronze, embora benéficas em ambientes controlados, requerem proteção adicional em climas tropicais para garantir a preservação de artefatos expostos ao ar livre.

3.2 MECANISMO QUÍMICO DE CORROSÃO DO BRONZE EM SOLUÇÕES SALINAS

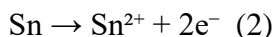
Quando o bronze é exposto a soluções salinas, como aquelas presentes em ambientes costeiros, o cloreto de sódio (NaCl) se dissocia em meio aquoso, liberando íons sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻). Dentre esses, os íons cloreto desempenham papel determinante no processo

corrosivo, pois interagem com a superfície metálica por meio de processos eletroquímicos e promovem a desestabilização das camadas passivas protetoras. Esse fenômeno ocorre por meio de reações eletroquímicas acopladas, envolvendo a oxidação dos constituintes metálicos da liga e a redução de espécies presentes no meio, especialmente o oxigênio dissolvido, resultando na formação de produtos de corrosão e na consequente degradação do material.

1. **Início da corrosão e formação de íons metálicos:** O processo corrosivo tem início com a oxidação do cobre presente na liga, na qual o metal perde elétrons e forma íons de cobre (Cu^{2+}), contribuindo diretamente para a instabilidade da superfície metálica e para a propagação das reações corrosivas.
2. **Oxidação do cobre e formação de produtos intermediários:** Na presença de oxigênio dissolvido e umidade, os íons de cobre formados podem reagir com íons hidroxila (OH^-), originando hidróxido de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), o qual pode evoluir para formas mais estáveis, como óxidos de cobre, em função das condições ambientais. Adicionalmente, em meios contendo dióxido de carbono (CO_2) ou íons cloreto (Cl^-), esses compostos podem sofrer transformações adicionais, resultando na formação de carbonatos e cloretos de cobre. O processo pode ser representado, de forma simplificada, pela seguinte equação:

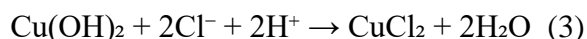


3. **Oxidação do estanho:** O estanho (Sn), outro componente da liga de bronze, também está sujeito à oxidação em ambientes salinos, formando inicialmente íons Sn^{2+} , conforme a reação:



Esses íons podem, posteriormente, interagir com espécies presentes no meio, como íons cloreto, dando origem a compostos como o cloreto de estanho (SnCl_2), contribuindo para a complexidade dos produtos de corrosão formados.

4. **Formação de produtos corrosivos complexos:** Os produtos gerados a partir da oxidação do cobre e do estanho podem interagir com íons presentes no meio, como cloretos e carbonatos, resultando na formação de compostos mais complexos. Esses produtos incluem cloretos básicos, carbonatos e óxidos hidratados, os quais constituem a pátina característica observada na superfície do bronze exposto a ambientes agressivos. Em condições específicas, especialmente na presença de íons cloreto e em meio levemente ácido, podem ocorrer reações adicionais envolvendo a transformação de hidróxidos em espécies mais solúveis, como exemplificado pela seguinte equação:



Essa reação favorece a solubilização dos produtos de corrosão, contribuindo para a desestabilização da pátina e para a progressão do processo corrosivo.

3.3 MECANISMO DE CORROSÃO

A corrosão é um fenômeno principalmente eletroquímico, caracterizado pela degradação de materiais metálicos devido à sua interação com o meio ambiente. Segundo Gentil (2018), esse fenômeno envolve reações de oxidação e redução que acontecem nas superfícies dos metais, especialmente quando há eletrólitos, como água e compostos químicos dissolvidos. Nesses contextos, surgem zonas distintas na superfície do metal, chamadas de regiões anódica e catódica, onde se realizam reações específicas.

No ânodo, o metal passa por um processo de oxidação, que resulta na liberação de elétrons e na formação de íons metálicos. Esses íons podem se dispersar ou criar compostos na superfície, como óxidos. Os elétrons liberados então se deslocam para a região do cátodo, onde interagem com elementos presentes no ambiente, como íons de oxigênio ou hidrogênio, originando produtos que variam de acordo com as condições atmosféricas e o tipo de metal envolvido.

Esse sistema é particularmente vulnerável a influências externas, incluindo a presença de poluentes no ar, como dióxido de enxofre, dióxido de carbono e cloretos, assim como a umidade relativa. Esses fatores, em combinação com as características do metal, como sua composição e microestrutura, afetam diretamente a velocidade de corrosão e as propriedades dos produtos gerados, como a pátina em superfícies de bronze.

A categorização dos processos de corrosão envolve duas categorias fundamentais:

- Corrosão química: acontece em locais onde não há eletrólitos líquidos, em situações como atmosferas secas ou em temperaturas elevadas, sendo marcada por reações de oxidação do metal de forma direta.
- Corrosão eletroquímica: é mais frequente em climas úmidos e em áreas tropicais, onde a existência de um eletrólito favorece as reações de oxidação e redução em várias partes da superfície metálica.

3.4 ANÁLISE E MONITORAMENTO DA CORROSÃO

A interação entre o cobre e suas ligas com o ambiente resulta na formação de diferentes produtos de corrosão, que variam conforme o tipo de atmosfera. Em regiões de atmosfera seca, o cobre tende a escurecer devido à formação de compostos de enxofre, enquanto em atmosferas úmidas surgem camadas mais finas e homogêneas de corrosão. Já em ambientes aquosos ou altamente salinos, essas camadas se tornam mais espessas e visíveis, evidenciando um processo de corrosão mais agressivo.

A atmosfera, por sua própria composição, possui características oxidativas naturais que promovem a corrosão de metais. O oxigênio presente em aproximadamente 21% da atmosfera, aliado à umidade do ar, atua como agente oxidante nas reações de oxirredução que levam à formação de óxidos e outros produtos corrosivos, conforme destaca Gentil (2018).

A maresia proveniente do mar representa um desafio adicional para monumentos históricos localizados em áreas costeiras, onde os níveis de corrosão atmosférica são elevados devido à elevada concentração de sais dissolvidos no ar. Esse fenômeno, comum em regiões tropicais e subtropicais, acarreta um processo de corrosão acelerado em ligas de cobre, promovendo uma degradação mais rápida, especialmente em metais que estão diretamente expostos ao ambiente.

As principais formas de corrosão observadas nos materiais metálicos incluem: corrosão uniforme, por placas, puntiforme, alveolar, intergranular e filiforme. Gentil (2018) descreve cada uma dessas formas de corrosão da seguinte maneira:

- Corrosão uniforme: Essa é a forma de corrosão mais comum, na qual a superfície metálica sofre desgaste de forma homogênea, com perda de material distribuída por toda a área exposta.
- Corrosão por placas: Caracteriza-se pela formação de camadas de óxido que se acumulam e eventualmente se destacam em forma de placas, até que o processo corrosivo comprometa a proteção e provoque a ruptura dessas camadas.
- Corrosão puntiforme: Tipo de corrosão concentrada em pequenas áreas, resultando em cavidades mais profundas do que largas, e que costuma ocorrer em materiais com camadas protetoras passivas, como o alumínio e os aços inoxidáveis.
- Corrosão alveolar: Esse tipo de corrosão localizada cria pequenas cavidades ou "alvéolos" na superfície do metal, sendo uma forma comum de ataque em ambientes agressivos.
- Corrosão intergranular: Acontece ao longo dos limites de grãos do material, podendo enfraquecer sua estrutura ao comprometer suas propriedades mecânicas, especialmente sob condições de tensão.
- Corrosão filiforme: Manifesta-se na forma de filamentos que se espalham sobre a superfície, geralmente sob revestimentos de tinta ou camadas de metal aplicadas por processos de metalização, sendo intensificada em ambientes úmidos.

3.5 REVESTIMENTO

Os revestimentos funcionam como barreiras físicas e químicas, isolando o substrato do meio corrosivo e, assim, prolongando a vida útil dos componentes metálicos e aumentando sua durabilidade.

Os revestimentos podem ser classificados em duas categorias principais: orgânicos e inorgânicos. Os revestimentos orgânicos, como tintas e vernizes, são frequentemente à base de polímeros, proporcionando boa aderência e flexibilidade. Segundo Fontana (1986), esses revestimentos formam uma película protetora que reduz o contato entre o metal e a umidade, contribuindo para a diminuição dos processos corrosivos.

Por outro lado, os revestimentos inorgânicos, como os sistemas à base de zincagem e os esmaltes cerâmicos, oferecem uma proteção mais robusta contra agentes corrosivos. Gentil (2018) destaca que os revestimentos inorgânicos possuem uma maior resistência a temperaturas extremas e a ataques químicos, tornando-os ideais para aplicações em ambientes severos.

A escolha do tipo de revestimento a ser utilizado deve considerar diversos fatores, como a natureza do material base, as condições ambientais e a finalidade do componente. Ramanathan (2016) enfatiza a importância da seleção adequada de revestimentos para garantir a eficácia na proteção contra a corrosão, além de melhorar a estética e a funcionalidade dos materiais.

Além disso, o desempenho dos revestimentos pode ser aprimorado por meio de tecnologias avançadas, como a incorporação de nanopartículas. Estudos indicam que o uso de materiais híbridos e nanocompósitos pode melhorar significativamente a resistência à corrosão, favorecendo o aumento da durabilidade dos materiais (Clemente et al., 2021).

4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O experimento foi conduzido utilizando chapas de bronze 85/15 (85% cobre e 15% estanho) com dimensões de 100 mm x 20 mm x 1 mm, expostas a uma câmara de névoa salina.

1. Preparação das chapas: As chapas de bronze foram submetidas a um processo de lixamento para otimizar a adesão dos vernizes.

Figura 1: Chapas de Bronze



Fonte: Autoria própria, 2024.

2. Aplicação dos revestimentos: Cada chapa de bronze foi submetida a um revestimento com um tipo específico de verniz. O processo de aplicação seguiu as orientações relativas ao tempo de cura recomendado, de modo a garantir a formação de uma película homogênea e uniforme sobre a superfície de cada chapa. Dessa forma, assegurou-se que os revestimentos fossem aplicados de maneira consistente em todas as amostras. A tabela 2 apresenta a composição dos vernizes utilizados em cada chapa.

Tabela 2: Composição dos Vernizes utilizados nas chapas de Bronze

VERNIZ	COMPOSIÇÃO PRINCIPAL
VERNIZ 1	Álcool isopropílico, nanopartículas de óxido de grafeno, nanopartículas de dióxido de silício, coloidal de titânio, agente formador de filme, polidimetilsiloxano, isoparafina, fragrância e propelente.
VERNIZ 2	Acetona, propano, destilados leves hidrotratados, butano, nafta, petróleo leve hidrotratado, dióxido de titânio, silicato de magnésio hidratado, etilbenzeno, éter monobutílico de etilenoglicol e solvente de Stoddart.
VERNIZ 3	Resina acrílica modificada, acetona, propanona, hidrocarbonetos, aditivos e propelente (propano/butano), 1,2,4-trimetilbenzeno, cumeno, etilbenzeno, propilbenzeno, mesitileno, xileno, zinco, solvente de nafta (petróleo), aromática leve e nafta de baixo ponto de ebulição.
VERNIZ 4	Éteres de celulose e Água.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

3. **Exposição à Névoa Salina:** A exposição das chapas revestidas ocorreu em uma câmara de névoa salina construída segundo as diretrizes das normas ASTM B117 e ISO 9227. Essas normas estabelecem condições padronizadas para testes acelerados de corrosão, simulando ambientes agressivos. A ASTM B117 especifica os parâmetros para gerar vapor de água saturado com cloreto de sódio (NaCl) em uma câmara controlada, enquanto a ISO 9227 complementa esses critérios para garantir repetibilidade e confiabilidade nos ensaios. As chapas foram mantidas em condições controladas durante 14 dias, a uma temperatura média de 25 °C, utilizando uma solução composta por água destilada e NaCl

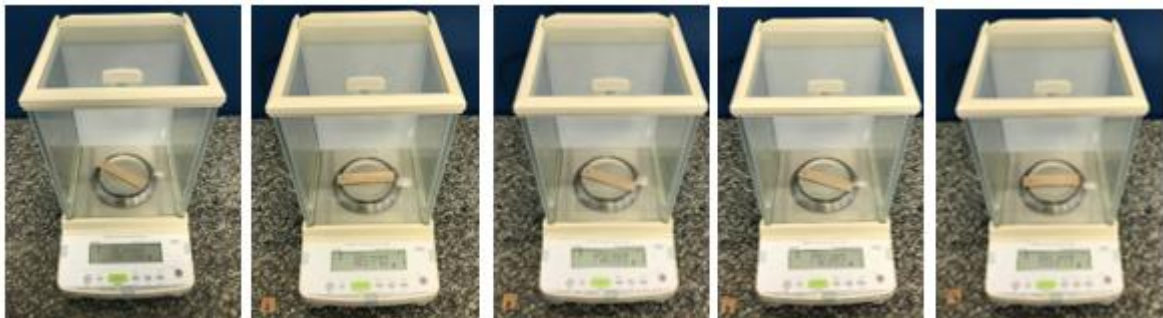
Figura 2: Câmara de Névoa Salina



Fonte: Autoria própria, 2024.

4. **Medição de massa:** A massa de cada chapa foi registrada com o uso de uma balança analítica modelo ATY 224 (Shimadzu), com capacidade máxima de 220 g e precisão de 0,1 mg, garantindo alta precisão nas medições.

Figura 3: Medição das chapas de Bronze



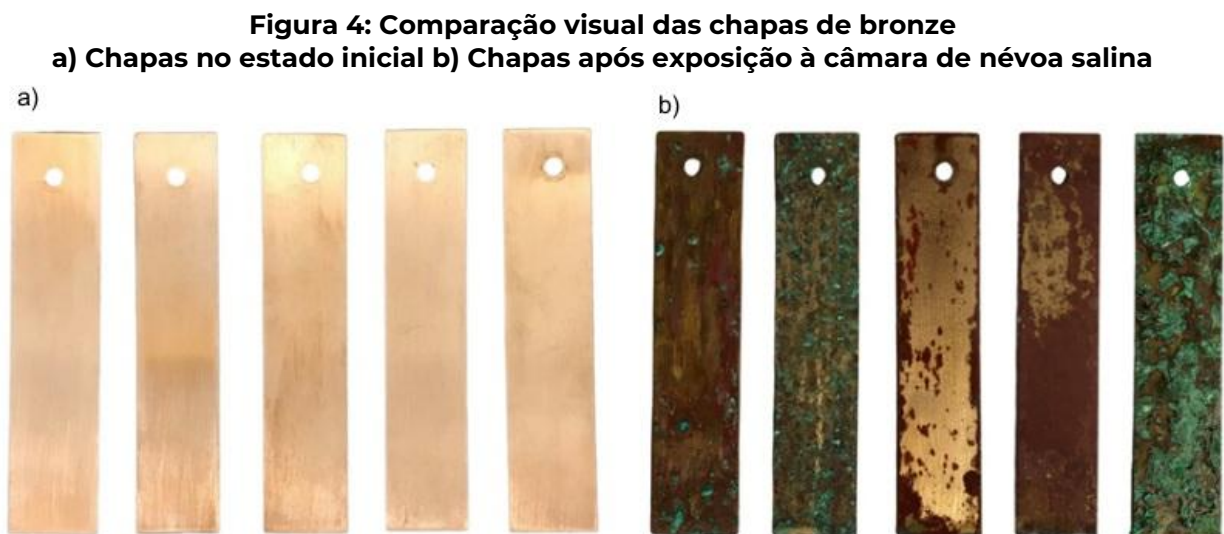
Fonte: Autoria própria, 2024.

Após a exposição na câmara de névoa salina, a massa de cada chapa foi medida para registrar o peso com os produtos de corrosão ainda presentes. Em seguida, as chapas passaram por uma etapa de decapagem, onde os produtos de corrosão foram removidos, permitindo uma medição final mais precisa. Ao longo do experimento, as medições de massa ocorreram em

quatro momentos distintos: inicialmente, para registrar a massa base antes da aplicação dos revestimentos; após a aplicação e cura dos vernizes, para identificar o ganho de massa; após a exposição na câmara de névoa salina, com os produtos de corrosão presentes; e, finalmente, após a decapagem, para determinar o grau exato de corrosão sofrido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foram empregadas chapas de bronze para analisar a corrosão em condições simuladas de clima tropical com exposição à névoa salina, visando compreender os efeitos desse processo sobre o patrimônio material. A variação na massa foi utilizada como um parâmetro para quantificar a corrosão em cada chapa, comparando as chapas com revestimento e a chapa controle, que não recebeu tratamento. A Figura 4 apresenta imagens comparativas das chapas de bronze antes do início do experimento e após o período de exposição, evidenciando visualmente a degradação sofrida, especialmente na chapa sem revestimento.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os dados apresentados na Tabela 3 indicam perda de massa para todas as chapas após a etapa de decapagem, evidenciando a remoção efetiva de material metálico em decorrência do processo corrosivo. Durante a exposição à névoa salina, há formação de produtos de corrosão aderidos à superfície; contudo, esses compostos são removidos na etapa de limpeza, permitindo a determinação mais precisa da perda de massa associada à corrosão.

Tabela 3: Avaliação da perda de massa em chapas após decapagem

Chapa	Massa Inicial (g)	Massa após a aplicação do Verniz (g)	Massa após a exposição à câmara de névoa salina (g)	Massa Após decapagem (g)	Diferença de massa inicial e após a decapagem (g)	Observação
Chapa Referência	19.2790 g	N/A	19.2953 g	18.9569 g	0.3221 g	Perda de massa
Chapa 1	18.3297 g	18.3355 g	18.3506 g	18.1121 g	0.2176 g	Perda de massa
Chapa 2	18.5770 g	18.7975 g	18.8091 g	18.3901 g	0.1869 g	Perda de massa
Chapa 3	17.8389 g	17.9264 g	17.9349 g	17.6649 g	0.1743 g	Perda de massa
Chapa 4	19.5377 g	19.6180 g	19.6434 g	19.2426 g	0.2951 g	Perda de massa

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 3, mostram a diferença de massa inicial e após a decapagem para as chapas de bronze. A chapa de referência, sem revestimento, apresentou uma diferença de 0,3221 g, indicando que a corrosão ocorreu de maneira mais evidente devido à ausência de proteção. Já para as chapas revestidas, os valores variaram conforme o tipo de verniz aplicado: 0,2176 g para a Chapa 1, 0,1869 g para a Chapa 2, 0,1743 g para a Chapa 3 e 0,2951 g para a Chapa 4.

Entre os revestimentos, o Verniz 1, composto por nanopartículas de óxido de grafeno e dióxido de silício, demonstrou uma proteção moderada. A formulação, que combina componentes orgânicos e inorgânicos, oferece uma camada protetora com maior resistência mecânica, mas permite uma certa penetração de umidade, refletindo-se em uma perda intermediária de massa após a decapagem. O Verniz 2, que contém dióxido de titânio e silicato de magnésio, apresentou um desempenho semelhante, embora ligeiramente inferior ao Verniz 3. Sua formulação híbrida também proporciona proteção razoável, mas não tão eficaz quanto a observada no Verniz 3, que se destacou por apresentar a menor diferença de massa após a decapagem. A superioridade do Verniz 3 deve-se à formação de uma camada uniforme e coesa de resina acrílica, que reduz significativamente a permeabilidade à umidade e ao oxigênio, minimizando os efeitos da corrosão.

Por outro lado, o Verniz 4, composto por éteres de celulose e água, foi o revestimento menos eficaz entre os testados. Apresentando a maior diferença de massa após a decapagem entre as chapas revestidas, sua formulação resulta em uma película mais frágil e porosa, facilitando a penetração de agentes corrosivos e comprometendo sua capacidade de proteção. Esses resultados indicam que revestimentos orgânicos à base de resina acrílica, como o Verniz 3, oferecem a proteção mais eficaz contra a corrosão em condições de névoa salina. Embora revestimentos híbridos que combinem componentes orgânicos e inorgânicos, como os Vernizes 1 e 2, possam oferecer benefícios adicionais, sua eficácia depende diretamente da formulação específica. Em contrapartida, revestimentos com maior porosidade, como o Verniz 4, demonstraram desempenho inferior na proteção das chapas de bronze.

Dando sequência à avaliação, os cálculos da taxa de corrosão foram realizados com base nos dados obtidos durante o experimento, utilizando a coluna ‘Diferença de massa inicial e após a decapagem (g)’ da Tabela 3.

Com base nas informações obtidas, foi possível calcular a taxa de corrosão em milímetros por ano (mm/ano), utilizando a metodologia padrão definida pela *National Association of Corrosion Engineers* (NACE), uma organização internacional especializada em normas de corrosão. Esse cálculo permite quantificar com precisão o impacto dos revestimentos aplicados, além de possibilitar a avaliação do comportamento da chapa de referência, que não recebeu qualquer tipo de proteção.

$$\text{Taxa de Corrosão (mm/ano)} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \quad (5)$$

Δm : Variação de Massa em gramas (massa inicial – massa após a decapagem)

A : Área superficial da chapa em cm^2 (frente e verso) ($100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ cm}^2$)

ρ : Densidade do Bronze $8,86 \text{ g/cm}^3$

t : Tempo de exposição convertido em anos ($14 \text{ dias} = 0,03836 \text{ ano}$)

Chapa referência:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{0.3221}{40.0 \cdot 8.86 \cdot 0.03836} = 0,0237 \text{ mm/ano} \quad (6)$$

Chapa 1:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{0.2176}{40.0 \cdot 8.86 \cdot 0.03836} = 0,0160 \text{ mm/ano} \quad (7)$$

Chapa 2:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{0.1869}{40.0 \cdot 8.86 \cdot 0.03836} = 0,0137 \text{ mm/ano} \quad (8)$$

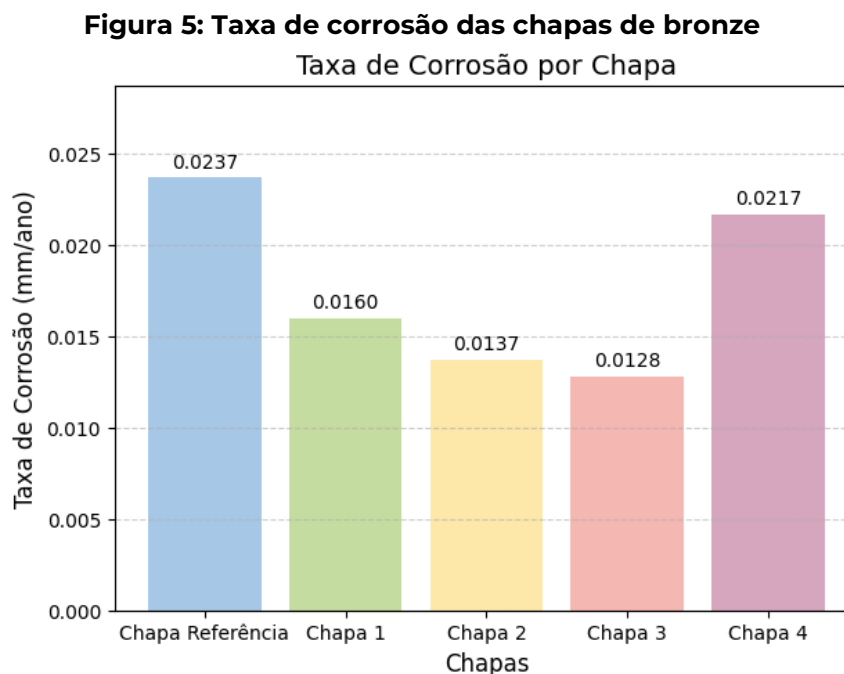
Chapa 3:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{0.1743}{40.0 \cdot 8.86 \cdot 0.03836} = 0,0128 \text{ mm/ano} \quad (9)$$

Chapa 4:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{0.2951}{40.0 \cdot 8.86 \cdot 0.03836} = 0,0217 \text{ mm/ano} \quad (10)$$

Com base nos cálculos realizados para cada amostra, foi possível determinar as taxas de corrosão correspondentes, permitindo uma análise comparativa entre as chapas avaliadas. A Figura 5 apresenta a comparação das taxas de corrosão das chapas de bronze.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os resultados das taxas de corrosão mostram variações no desempenho das chapas, refletindo a interação entre o bronze e os agentes corrosivos presentes no ambiente, como a névoa salina, que favorece a formação de produtos de corrosão, como óxidos e carbonatos. Essas reações resultam na perda de massa do material, que é diretamente proporcional à taxa de corrosão.

A chapa referência, sem revestimento, apresentou uma taxa de 0,0237 mm/ano, refletindo a corrosão direta da superfície metálica, com conseqüente perda de massa. Esse valor evidencia que, sem a proteção de um revestimento, o bronze sofreu uma corrosão significativa devido à ação dos agentes corrosivos presentes no ambiente.

A chapa 1, com revestimento de nanopartículas, apresentou uma taxa de 0,0160 mm/ano, o que representa uma diminuição em relação à chapa referência, mas ainda assim considerável. Esse resultado sugere que o revestimento teve algum efeito de proteção, indicando redução parcial da ação dos agentes corrosivos, embora não tenha sido completamente eficaz em impedir a corrosão. A permeabilidade do revestimento ou possíveis falhas de aderência podem ter permitido a passagem de agentes corrosivos, resultando em uma taxa de corrosão ainda elevada.

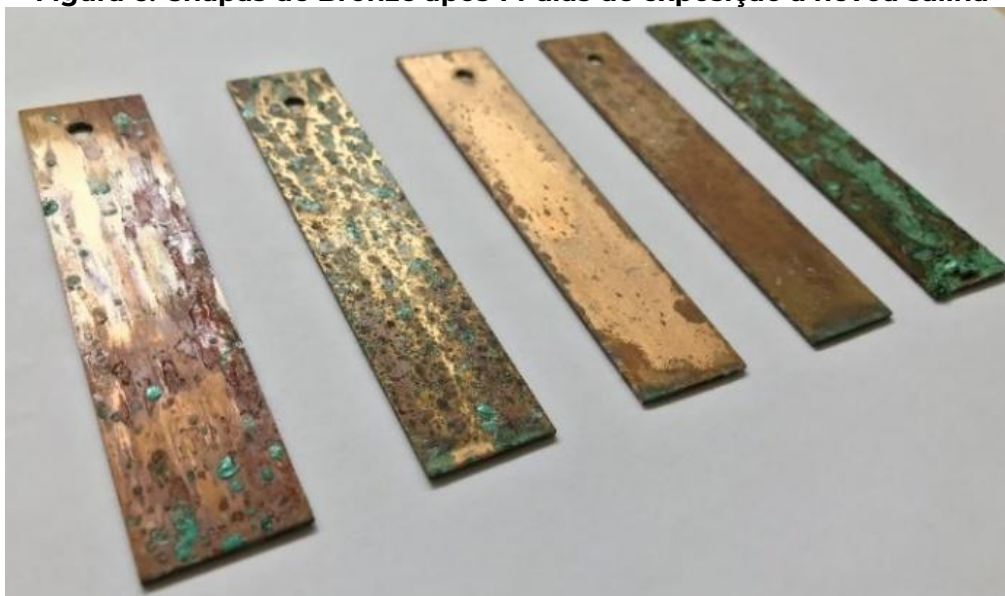
A chapa 2, com revestimento híbrido de acetona, propano, nafta, dióxido de titânio e outros solventes, obteve uma taxa de 0,0137 mm/ano, sendo ligeiramente menor que a chapa 1. Embora tenha mostrado uma redução na taxa de corrosão em comparação com a chapa referência, esse valor ainda indica que o revestimento apresentou eficiência intermediária na proteção do material. Isso sugere que o tipo de revestimento utilizado na chapa 2 não foi capaz de formar uma barreira totalmente eficiente contra os agentes corrosivos, ou que houve falhas na aplicação do revestimento, permitindo que a corrosão continuasse.

A chapa 3, com revestimento híbrido de resina acrílica, acetona, hidrocarbonetos e aditivos, apresentou uma taxa de 0,0128 mm/ano, que é ainda menor que as chapas 1 e 2. Esse resultado indica o melhor desempenho entre os revestimentos avaliados, sugerindo maior eficiência na formação de uma barreira protetora contra a penetração de umidade e agentes corrosivos. Apesar disso, a presença de uma taxa de corrosão diferente de zero indica que o revestimento não eliminou completamente o processo corrosivo, mas foi o mais eficaz na sua redução.

A chapa 4, com éteres de celulose e água, exibiu a maior taxa de corrosão entre as amostras, 0,0217 mm/ano, que é muito próxima da chapa referência, sem revestimento. Esse resultado indica baixa eficiência do revestimento como barreira protetora, sugerindo que o material não foi capaz de impedir de forma significativa a ação dos agentes corrosivos.

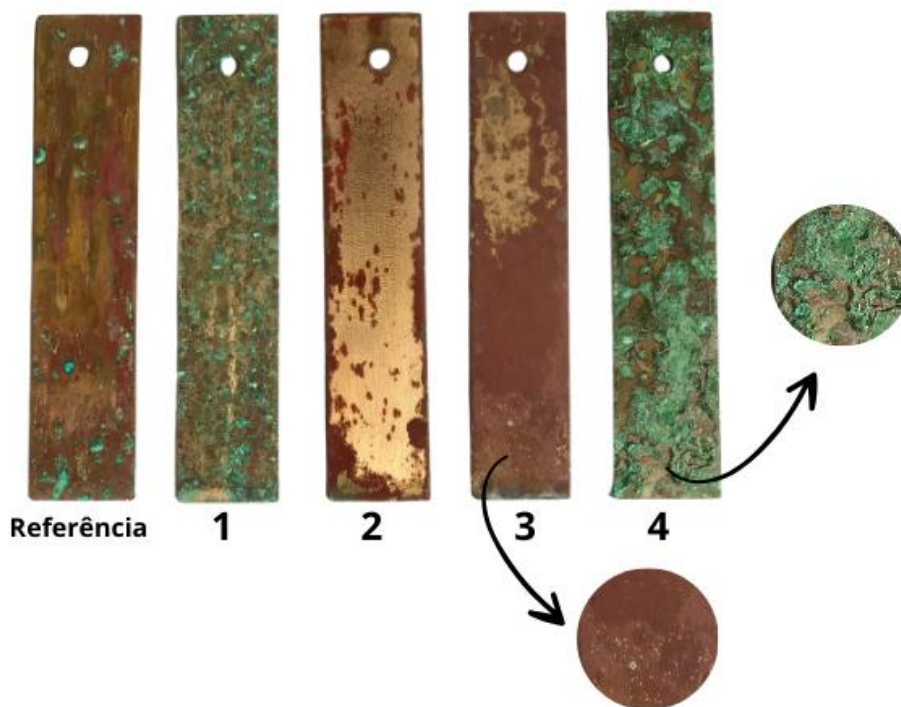
Além da avaliação quantitativa por variação de massa, a análise visual das chapas também foi realizada, permitindo observar distintos padrões de corrosão em cada amostra. A integridade das chapas expostas à névoa salina revelou áreas de desgaste e oxidação, que corroboram os dados das taxas de corrosão. A Figura 6 ilustra as superfícies das chapas, evidenciando as variações no desempenho de cada revestimento frente ao ambiente corrosivo.

Figura 6: Chapas de Bronze após 14 dias de exposição à névoa salina



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 7: Imagens ampliadas da superfície das chapas de bronze



Fonte: Autoria própria, 2024.

As imagens ampliadas na Figura 7 mostram em detalhes a textura da corrosão nas chapas. Observa-se que os Vernizes 2 e 3 mantiveram a superfície parcialmente íntegra, enquanto o Verniz 4 apresentou falhas evidentes, com formação de produtos de corrosão em áreas descamadas.

A chapa de referência, sem nenhum revestimento, apresentou um escurecimento generalizado, formação de pontos de pátina com coloração verde e corrosão filiforme caracterizando um padrão de corrosão uniforme típico em superfícies de bronze expostas a ambientes salinos. A distribuição irregular dos produtos de corrosão é indicativa da ausência de qualquer barreira protetora. Na chapa revestida com Verniz 1, a análise visual revelou pontos esbranquiçados e áreas com acúmulo de substâncias, possivelmente associados à formação de óxidos e sais pela corrosão.

A presença de nanopartículas no Verniz 1 ofereceu certa resistência contra a corrosão, mas ainda se observa corrosão alveolar em toda a superfície. O Verniz 2, por sua vez, mostrou escurecimento nas extremidades e pontos esbranquiçados, sugerindo proteção parcial onde o revestimento retardou, mas não bloqueou completamente a corrosão.

O Verniz 3, formulado com resina acrílica modificada, demonstrou melhor integridade superficial ao final do experimento. A camada de revestimento permaneceu coesa, sem sinais de microfissuras ou descamações visíveis, o que contribuiu para a menor variação de massa observada. Esse verniz formou uma barreira contínua, eficaz na prevenção da penetração de soluções salinas e na formação de produtos de corrosão na superfície.

Em contraste, o Verniz 4 apresentou descamação em várias áreas e formação de pátina com coloração verde nos pontos onde o revestimento se despreendeu. Essas falhas indicam uma menor resistência do filme protetor, permitindo a infiltração de umidade e salinidade, o que acelerou a formação de produtos de corrosão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a relevância dos revestimentos anticorrosivos na proteção de chapas de bronze expostas a condições simuladas de clima tropical. Os diferentes tipos de verniz testados apresentaram desempenhos variados, evidenciando que a formulação e a aplicação adequadas são fatores determinantes para a eficácia protetiva.

Entre os revestimentos avaliados, aqueles à base de resina acrílica destacaram-se pela capacidade de formar uma barreira protetora coesa, reduzindo significativamente os efeitos da corrosão. Em contraste, revestimentos com maior porosidade ou fragilidade estrutural, como os à base de éteres de celulose, demonstraram desempenho limitado, comprometendo a proteção da superfície metálica.

A análise visual das chapas corroborou os resultados, revelando diferenças significativas na integridade das superfícies após a exposição à névoa salina. Chapas revestidas com formulações mais robustas apresentaram menor degradação, enquanto revestimentos menos eficazes permitiram a formação de produtos de corrosão e falhas no filme protetor.

Apesar de suas contribuições, o estudo apresentou limitações, como o curto período de exposição e a quantidade reduzida de amostras. Estudos futuros poderão expandir esses parâmetros, incluindo condições ambientais mais variadas e formulações alternativas de revestimentos, especialmente aquelas alinhadas às demandas por sustentabilidade, como soluções à base de água ou biodegradáveis.

Conclui-se que o desenvolvimento e a aplicação de revestimentos anticorrosivos de alta eficácia são indispensáveis para proteger o bronze contra os efeitos agressivos da corrosão em condições climáticas tropicais. Essas estratégias são fundamentais para garantir a preservação de patrimônios materiais, especialmente em ambientes de alta umidade e salinidade, contribuindo para sua conservação a longo prazo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

CALLISTER JR., William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CLEMENTE, G. A. B. F.; GONÇALVES, G. H.; NASSAR, E. J.; MOLINA, E. F.; ROCHA, L. A. O uso de materiais híbridos ou nanocompósitos como revestimentos anticorrosivos do aço. *Química Nova*, v. 44, n. 9, p. 1219-1223, 2021.

FONTANA, Mars G. Corrosion engineering. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 6. ed. São Paulo: LTC, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Clima do Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/climatologia>. Acesso em: 17 abr. 2026.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Apresentação. Disponível em: <https://www.gov.br/iphan/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/apresentacao>. Acesso em: 2024.

RAMANATHAN, L. V. Corrosão e seu controle. São Paulo: Hemus, 1997.

RAMANATHAN, L. V. Protective coatings: properties and applications. New York: Springer, 2016.

SAE INTERNATIONAL. SAE J461: Wrought and Cast Copper Alloys. Warrendale, 2018.

SCOTT, David A. Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2002.

WEIL, D. The effects of air pollution on cultural monuments and buildings. Science of the Total Environment, v. 14, n. 3, p. 227-234, 1980.