

BIOINIBIDORES DE CORROSÃO NO AÇO DO CONCRETO ARMADO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CORROSION BIOINHIBITORS IN REINFORCED CONCRETE STEEL: A LITERATURE REVIEW

Marina Cartaxo Braga Moraes de Oliveira ¹; Geordanne Eloan Silva de Abreu ²; Tacila Bertulino de Souza ³; Marcos David dos Santos ⁴; Robson Arruda dos Santos ⁵; Antonio Acácio de Melo Neto ⁶.

¹Mestranda | cartaxo.braga@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; ²Engenheiro Civil | geordanneb@hotmail.com | IFPB | Cajazeiras, Brasil; ³Doutoranda | tacila.bertulino@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; ⁴Doutorando | marcos.david@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; ⁵Doutor | robson.santos@ifpb.edu.br | IFPB | Cajazeiras, Brasil; ⁶Doutor | antonio.meloneto@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil

Resumo:

A corrosão das armaduras metálicas em estruturas de concreto armado compromete sua durabilidade e segurança, exigindo soluções eficazes e sustentáveis. Os bioinibidores naturais, especialmente extratos vegetais, vêm sendo estudados como alternativas aos inibidores sintéticos tradicionais, que apresentam alta toxicidade e custo. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura, com base em publicações indexadas nas bases *Scopus* e *Web of Science*, a fim de identificar compostos naturais com potencial inibitório. A estratégia de busca utilizou os termos “*green corrosion inhibitor*”, “*reinforced concrete*” e “*rebars corrosion*”, resultando na seleção de 25 estudos. A análise abrangeu ensaios em solução simulada dos poros do concreto e aplicação direta em argamassas e concretos. Os resultados indicaram que diversos extratos vegetais, como *Mangifera indica*, *Cymbopogon citratus* e farinha de glúten de milho, atingiram eficiências inibitórias superiores a 95%, com destaque para 99,72% com o uso do glúten. No entanto, observou-se a carência de investigações quanto à durabilidade de longo prazo e efeitos mecânicos no concreto. Conclui-se que os bioinibidores representam alternativas promissoras aos compostos sintéticos, desde que validados em estudos práticos mais robustos, incentivando o avanço de pesquisas aplicadas no tema.

Palavras-chave:

Bioinibidores; Plantas; Corrosão; Concreto Armado; Sustentabilidade.

Abstract:

The corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete structures compromises both durability and structural safety, demanding effective and sustainable solutions. Natural corrosion inhibitors, particularly plant-based extracts, have been studied as alternatives to conventional synthetic inhibitors, which are often costly and toxic. This article presents a systematic literature review, based on publications indexed in the *Scopus* and *Web of Science* databases, aiming to identify natural compounds with inhibitory potential. The search strategy employed the descriptors “*green corrosion inhibitor*”, “*reinforced concrete*” and “*rebars corrosion*”, resulting in the selection of 25 studies. The analysis covered simulated concrete pore solution (SCP) tests and direct applications in mortars and concretes. The results showed that several plant extracts—such as *Mangifera indica*, *Cymbopogon citratus*, and corn gluten meal—achieved inhibition efficiencies above 95%, with a maximum value of 99.72% for the corn extract. However, research that addresses long-term durability and mechanical effects on concrete is lacking. It is concluded that bioinhibitors are promising alternatives to synthetic compounds, provided they are validated through more robust practical studies, encouraging the advancement of applied research in this field.

Keywords:

Bioinhibitors; Plants; Corrosion; Reinforced Concrete; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do concreto armado como elemento estrutural na construção civil é uma prática amplamente consolidada, devido sua resistência mecânica e versatilidade. Contudo, um dos principais desafios enfrentados está relacionado à corrosão das armaduras metálicas, fenômeno recorrente que, segundo Schmoeller e Lima (2021), pode comprometer a integridade das estruturas, ocasionando rupturas parciais ou até mesmo colapsos totais. A deterioração do aço em estruturas de concreto representa um problema significativo na engenharia civil, afetando diretamente a durabilidade e a segurança das edificações. De acordo com Silva (2006), trata-se, em sua essência, de um processo eletroquímico que se inicia na presença simultânea de água, oxigênio e íons agressivos.

Diversos fatores internos influenciam a velocidade com que esse processo corrosivo ocorre, tais como a espessura da camada de cobrimento do concreto, sua permeabilidade, resistência elétrica, o ambiente de exposição da estrutura e os materiais utilizados na mistura, incluindo cimento, areia e brita. Esses elementos exercem papel determinante na evolução da corrosão, sendo objeto de inúmeras investigações científicas. Dentre os métodos de prevenção adotados, destaca-se a incorporação de agentes inibidores de corrosão, sendo os sintéticos os mais utilizados até o momento, como nitrito de cálcio. No entanto, cresce o debate sobre alternativas mais sustentáveis que reduzam os riscos socioambientais associados à toxicidade e aos altos custos desses compostos artificiais.

Nesse contexto, os inibidores naturais, obtidos a partir de extratos vegetais ou resíduos biodegradáveis, vêm se destacando por sua composição rica em moléculas antioxidantes capazes de mitigar os processos corrosivos. Por sua natureza ecologicamente compatível, esses compostos têm atraído o interesse de pesquisadores preocupados em desenvolver soluções eficientes e ambientalmente seguras para a proteção de estruturas em concreto armado. Segundo Bezerra (2022), estudos recentes demonstram o potencial promissor desses extratos naturais como substitutos viáveis aos inibidores sintéticos, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais e econômicos.

A investigação dos chamados bioinibidores de corrosão permite compreender seus mecanismos de ação, características físico-químicas e aplicabilidade na conservação de estruturas de concreto. Conforme aponta Dantas (2018), os inibidores sustentáveis vêm ganhando relevância tanto no meio acadêmico, impulsionando novas pesquisas, quanto na indústria da construção civil, onde têm sido aplicados com resultados encorajadores. Também denominados inibidores verdes, esses compostos são oriundos de fontes naturais e orgânicas, cujos princípios ativos oferecem uma ampla gama de possibilidades para estudos científicos, evidenciando um campo promissor ainda em expansão.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura científica sobre o uso de bioinibidores na proteção de armaduras em concreto armado, comparando a eficácia de diferentes extratos naturais e discutindo os mecanismos de atuação desses compostos.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa foi a revisão bibliográfica sistematizada, compreendida como um procedimento técnico de natureza científica que visa ao levantamento, à seleção crítica e à análise de publicações relevantes sobre um tema específico. Essa abordagem permite a compreensão aprofundada do estado da arte e a discussão fundamentada das principais questões relacionadas ao objeto de estudo. O método adotado seguiu as diretrizes propostas por Biolchini *et al.* (2005), estruturando-se em três etapas: planejamento, execução e análise dos resultados.

Na fase de planejamento, foram definidos os objetivos da revisão e estabelecidos os critérios e protocolos de busca. Os principais propósitos foram: compreender o processo de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado; identificar e comparar as principais características

dos bioinibidores artificiais e naturais; entender os mecanismos de atuação desses compostos; e reunir evidências que demonstrassem ou indicassem sua eficácia na mitigação da corrosão.

Durante a etapa de execução, foi realizada a busca por publicações nas bases de dados Scopus e Web of Science, acessadas por meio do Portal de Periódicos da CAPES. As palavras-chave utilizadas na estratégia de busca incluíram as expressões: “*green corrosion inhibitor*”, “*reinforced concrete*” e “*rebars corrosion*”. Inicialmente, foram avaliados os títulos e resumos dos trabalhos encontrados, com vistas à seleção preliminar conforme a aderência aos objetivos propostos. Os estudos considerados pertinentes foram então selecionados para análise integral.

Por fim, na etapa de análise dos resultados, foram examinadas publicações de diferentes naturezas, entre eles, artigos científicos, livros, monografias, dissertações e teses, cujos conteúdos relevantes foram sistematizados para embasar a discussão e a contextualização do tema. Após o processo de triagem e análise, 25 estudos foram considerados válidos e integraram o corpo da revisão bibliográfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CORROSÃO DO AÇO DO CONCRETO ARMADO E O PAPEL DOS BIOINIBIDORES

A corrosão das armaduras metálicas em estruturas de concreto armado é um dos principais fatores de deterioração dessas obras, afetando diretamente sua durabilidade, segurança e vida útil. Esse fenômeno ocorre, em geral, quando a camada passiva que protege o aço é rompida, permitindo o contato direto com agentes agressivos. A camada passiva é formada naturalmente graças à elevada alcalinidade da matriz cimentícia, que induz à formação de óxidos protetores sobre a superfície metálica (Silva, 2006).

De acordo com Casanova *et al.* (2023), o pH elevado do concreto fresco, geralmente acima de 12,5, favorece a formação de uma película protetora composta por hematita e magnetita, que isola o aço de ambientes corrosivos. Entretanto, essa proteção pode ser rompida por processos químicos, mecânicos ou eletrolíticos, como a carbonatação e o ataque por íons cloreto, tornando o aço vulnerável à corrosão.

A carbonatação decorre da reação entre dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e os compostos alcalinos do cimento, principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o que reduz o pH do concreto e favorece a formação de produtos de corrosão expansivos, como o hidróxido de ferro. Essa reação causa aumento de volume, gerando fissuras e desprendimento do cobrimento. Já os íons cloreto, presentes em ambientes marinhos, aditivos contaminados ou solos salinos, são ainda mais agressivos, pois podem romper a passivação mesmo em meio alcalino, promovendo corrosão localizada do tipo pite (Böhni, 2005).

Segundo Böhni (2005), quatro condições fundamentais devem estar presentes para que o processo corrosivo se estabeleça: (i) presença de oxigênio; (ii) umidade ou meio eletrolítico; (iii) ruptura da camada passiva; e (iv) continuidade elétrica da armadura. Esta última é geralmente considerada garantida em estruturas de concreto armado, onde as barras metálicas estão eletricamente conectadas.

Diversos fatores contribuem para acelerar ou retardar esse processo, como a espessura da camada de cobrimento, a permeabilidade do concreto, a qualidade dos materiais, as condições ambientais e as técnicas construtivas empregadas. Diante dessa complexidade, estratégias de mitigação da corrosão têm sido amplamente estudadas, com destaque para o uso de inibidores de corrosão.

Os inibidores convencionais, como nitrito de cálcio, molibdato e cromato, atuam formando barreiras protetoras ou promovendo a repassivação do aço. São classificados, conforme Venkatesh, Mohiddin e Ruben (2019), em três categorias: anódicos, que bloqueiam a reação no ânodo; catódicos, que reduzem a reação no cátodo; e mistos, que combinam ambos os mecanismos. Os inibidores anódicos, embora eficazes, podem gerar corrosão localizada se dosados incorretamente.

Já os catódicos apresentam menor risco, mas menor eficiência. Os mistos são geralmente mais equilibrados.

Apesar da eficácia comprovada dos inibidores sintéticos, crescem as preocupações com seu impacto ambiental. Casanova *et al.* (2023) alertam que compostos como nitritos podem causar toxicidade aquática e acumular-se na cadeia alimentar, apresentando riscos à saúde humana. Como resposta a esse cenário, surgem os bioinibidores, também chamados de inibidores verdes.

Os bioinibidores são substâncias de origem natural, geralmente extraídas de plantas ou resíduos orgânicos, com propriedades antioxidantes e compostos funcionais capazes de se adsorver à superfície do aço. Galleguillos Madrid *et al.* (2024) destacam que essas substâncias se alinham aos princípios de sustentabilidade, apresentando biodegradabilidade, baixo custo e ausência de toxicidade ao longo do ciclo de vida.

O mecanismo de ação dos bioinibidores baseia-se na adsorção física (fisissorção) ou química (quimissorção) de seus constituintes, como flavonoides, taninos, saponinas, alcaloides e outros fitoquímicos, à superfície metálica. Essas moléculas frequentemente contêm heteroátomos (como O, N ou S), anéis aromáticos e ligações duplas conjugadas, que interagem com os orbitais do ferro, formando uma película protetora que dificulta o acesso de água, oxigênio e íons agressivos (Casanova *et al.*, 2023).

Além dos extratos vegetais, algumas substâncias de origem animal também têm sido estudadas. Zhang *et al.* (2019) demonstraram que o mexilhão comum (*Mytilus edulis*) produz uma proteína adesiva com capacidade de formar filmes protetores e de autocura em superfícies de aço expostas a íons cloreto. Os bioinibidores podem ser aplicados por diferentes métodos: incorporados diretamente à matriz do concreto, aplicados como revestimento superficial ou adicionados a tintas protetoras para armaduras expostas. Essa versatilidade amplia seu potencial de uso na construção civil, aproximando-os de soluções comerciais já consolidadas.

3.2. BIOINIBIDORES A BASE DE PLANTAS

A crescente preocupação ambiental diante do consumo excessivo de recursos não renováveis tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis no setor da construção civil. Nesse contexto, a substituição de aditivos industriais por alternativas de origem natural ganha destaque. Casanova *et al.* (2023) ressaltam a importância da formulação de inibidores verdes a partir de fontes renováveis, especialmente extratos vegetais, que oferecem ampla disponibilidade, baixo custo e menor impacto ambiental.

Tais extratos são compostos por fitoquímicos, substâncias bioativas como saponinas, taninos, alcaloides, flavonoides, ésteres, proteínas e aminoácidos, dotadas de capacidade antioxidante e elevada afinidade com superfícies metálicas. De acordo com Ahmed e Ganesh (2022), esses compostos interagem com os íons metálicos do aço, formando uma película protetora fortemente aderida que reduz a taxa de reações anódicas e catódicas, inibindo a corrosão.

A matéria-prima para obtenção de inibidores vegetais pode ser oriunda de diversas partes das plantas, como raízes, caules, folhas, flores, frutos e sementes, além de resíduos agrícolas e industriais. Conforme Sheydaei (2024), as folhas são comumente utilizadas por concentrarem maior quantidade de fitoquímicos, embora outras partes também possam ser aproveitadas dependendo da espécie e do objetivo do estudo.

A extração dos compostos bioativos é uma etapa crítica que define a qualidade e a eficiência do inibidor. Como ilustrado na Figura 1 (adaptado de Miralrio e Espinoza, 2020), o processo inicia-se com a escolha do solvente, cuja polaridade deve ser compatível com os fitoquímicos-alvo. Os solventes mais utilizados incluem água, metanol, acetona, hexano, diclorometano, acetato de etila, entre outros.

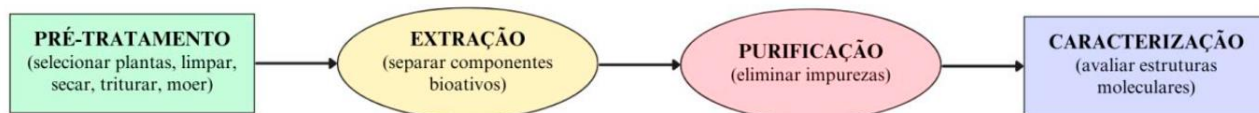


Figura 1: Etapas de obtenção de fitoquímicos.
Fonte: Adaptado de Miralrio e Espinoza (2020).

Os métodos tradicionais de extração incluem maceração, infusão, decocção, digestão e percolação (Malini, Saranya e Parameswari, 2023). A maceração é realizada com o material vegetal triturado ou cortado, imerso em solvente por, no mínimo, três dias, com agitação constante, seguida de filtração. A infusão consiste em uma maceração rápida com água fervente, visando a extração de constituintes solúveis. A decocção envolve a fervura da matéria-prima em água por tempo determinado. A digestão utiliza solventes levemente aquecidos para melhorar a solubilidade dos compostos, preservando suas propriedades bioativas. Já a percolação é um processo realizado à temperatura ambiente, em que a matéria-prima umedecida é colocada em um percolador, sendo o extrato obtido gota a gota, com alta eficiência e menor tempo de extração (Miralrio; Espinoza, 2020).

Após a extração, os compostos ativos podem ser isolados e purificados com o uso de adsorventes como sílica gel, celulose, nitrato de prata e alumina. A separação e quantificação das frações fitoquímicas são realizadas por técnicas de cromatografia — como cromatografia em coluna, de camada fina (TLC), líquida, gasosa ou em papel (Donkor *et al.*, 2022).

A caracterização estrutural das moléculas extraídas é fundamental para confirmar a presença e o tipo de princípios ativos. Isso é realizado por meio de técnicas espectroscópicas, como espectroscopia de infravermelho (FTIR), ressonância magnética nuclear (RMN) e espectrometria de massas, permitindo identificar os grupos funcionais responsáveis pela adsorção ao metal e pela inibição do processo corrosivo.

A interação dos fitoquímicos com a superfície metálica pode ocorrer por dois mecanismos distintos: adsorção física (fisissorção), que ocorre por interações fracas, como forças de Van der Waals, sem alteração das estruturas moleculares, o que normalmente resulta em menor eficácia inibitória e menor estabilidade da película protetora; e adsorção química (quimissorção), que envolve a formação de ligações químicas mais fortes, como ligações de hidrogênio e coordenação com os orbitais do ferro. Essa interação gera uma barreira resistente e eficaz contra a corrosão (Donkor *et al.*, 2022).

3.3. ENSAIO DE BIOINIBIDORES DE CORROSÃO DO AÇO EM SOLUÇÃO

Diversos ensaios acelerados têm sido utilizados para representar a multiplicidade de condições reais de corrosão. Com o objetivo de simular ambientes de exposição em laboratório, pesquisadores adotam diferentes abordagens experimentais, o que resulta em uma ampla variedade de métodos e procedimentos para a indução acelerada da corrosão (Meira; Ferreira, 2019). A escolha dos métodos e das soluções utilizadas nos ensaios leva em consideração múltiplas variáveis. Nesse sentido, Casanova *et al.* (2023), assim como outros estudos internacionais revisados, destacam a aplicação do ensaio em *Simulated Concrete Pore Solution* (SCP). De forma sucinta, esse método consiste na formação prévia de uma película passiva sobre a armadura, a qual é então imersa em uma solução simulada dos poros do concreto. O objetivo é avaliar a eficiência de inibição da corrosão (*inhibition efficiency*, IE%), sendo que, valores superiores a 80% são indicativos de um desempenho satisfatório para inibidores à base de extratos vegetais (Sheydaei, 2024).

Em diversas publicações analisadas, observou-se que o aumento da concentração do extrato vegetal, especialmente aqueles obtidos de folhas, resulta em melhor desempenho na inibição da corrosão, uma vez que favorece a formação de uma película protetora sobre a superfície do aço. Contudo, outros fatores também influenciam a eficácia dos extratos. Zhang (2021), por exemplo, estudou folhas da árvore do lenço (*Davidia involucrata*) e verificou que o aumento da temperatura do extrato elevou a absorção de fitoquímicos sobre o aço. De forma semelhante, Harb *et al.* (2020) demonstraram que a eficiência do extrato da folha de oliveira (*Olea europaea*) varia conforme a

polaridade do solvente utilizado na extração, influenciando diretamente a composição final dos compostos ativos.

Entre os bioinibidores analisados, a *Rosa damascena* apresentou desempenho relevante na proteção do aço em solução SCP contendo cloretos. O estudo conduzido por Anitha *et al.* (2019) identificou fitoquímicos com grupos orgânicos funcionais capazes de bloquear o fluxo de elétrons, atuando como uma barreira eficaz contra íons agressivos.

Outro exemplo promissor foi o extrato da folha de algaroba (*Prosopis juliflora*), cuja adição reduziu significativamente a corrosão do aço embutido em concreto exposto à solução de NaCl. A pesquisa de Palanisamy *et al.* (2016) mostrou que o extrato formou uma camada protetora sobre a armadura, além de alterar as reações anódicas e catódicas envolvidas no processo corrosivo.

Por fim, o extrato de manga (*Mangifera indica*) demonstrou ação mista, atuando tanto na região do ânodo quanto do cátodo. A introdução de 2% em peso do extrato resultou em uma eficiência de inibição de até 98%, com significativa redução da corrosão após 48 horas de exposição ao agente agressivo (Rahmani *et al.*, 2024).

3.4. ENSAIO DE BIOINIBIDORES DE CORROSÃO NO CONCRETO

Os compostos inibidores de corrosão analisados nesta revisão podem ser aplicados diretamente às amostras de concreto por diferentes métodos, incluindo: adição do extrato ao traço do concreto ou da argamassa; aplicação direta sobre a armadura de aço; ou cobertura da superfície externa do concreto. É relevante destacar que alguns extratos apresentam propriedades hidrofóbicas, como observado no caso da *Bambusa arundinacea* (espécie de bambu). De acordo com Asipita *et al.* (2014), certos inibidores verdes reagem quimicamente com a matriz cimentícia, formando sais hidrofóbicos que bloqueiam os poros do revestimento do concreto, dificultando a penetração de agentes agressivos e, conseqüentemente, impedindo a despasseificação da armadura.

A mamona (*Ricinus communis*) apresentou comportamento inibidor misto, com atuação física e química. O composto ativo atraiu íons cloreto em excesso e estabeleceu ligações químicas com a superfície do aço, resultando na formação de uma camada isolante. Além disso, a presença do extrato promoveu um aumento na resistência à compressão e à tração do concreto (Palanisamy *et al.*, 2018).

O estudo conduzido por Argiz *et al.* (2022) também merece destaque, pois investigou o uso do ácido ascórbico como inibidor de corrosão. Os resultados mostraram que esse composto, presente em frutas cítricas, apresentou desempenho comparável ao dos nitritos que são os inibidores amplamente utilizados na indústria. O efeito inibitório do ácido ascórbico foi duradouro, com eficácia mantida por até oito meses. Contudo, os autores alertam que concentrações elevadas podem intensificar a corrosão. O fato de o ácido ascórbico estar naturalmente presente em frutas indica o potencial inibitório dessas fontes vegetais.

Outro exemplo relevante é o uso de extrato de farinha de milho em argamassas, que demonstrou eficiência de inibição semelhante ao nitrito de cálcio. Este extrato proporcionou uma redução na ação corrosiva dos íons cloreto, promovendo a retardação da corrosão. No entanto, os estudos não avaliaram possíveis alterações nas propriedades mecânicas da argamassa (Zhang *et al.*, 2022).

A reutilização de resíduos agrícolas e orgânicos como matéria-prima para a produção de bioinibidores de corrosão representa uma alternativa sustentável, com potencial para mitigar impactos ambientais relacionados à agroindústria e às atividades urbanas. Muitos resíduos que seriam descartados podem ser transformados em recursos valiosos em propostas sustentáveis, resultando em produtos ambientalmente seguros e sem restrições de uso.

Com essa perspectiva, Song *et al.* (2022) investigaram a reutilização de folhas secas de *Platanus acerifolia* (espécie comum na Europa e em regiões temperadas), coletadas na cidade de Nanjing, província de Jiangsu, China. As folhas passaram por etapas de lavagem, remoção de impurezas, secagem, moagem, peneiramento e, por fim, extração. O extrato obtido apresentou fitoquímicos com propriedades inibidoras mistas, alcançando alta eficiência de inibição da corrosão, comparável

a compostos disponíveis comercialmente. A Tabela 1 apresenta a síntese dos principais bioinibidores revisados.

Substância	Teste	Modelo da mistura	IE (%)	Inibidor	Cl ⁻ (agente agressivo)
<i>Rosa damascena</i>	SCP	-	82	12 v/v%	0,5 M de NaCl
Extrato de folha de oliveira	Solução de NaOH 0,1M	-	91,9	-	0,5 M de NaCl
<i>Prosopis juliflora</i> (Algaroba)	SCP	-	91	100 ppm	3,5% em peso de NaCl
<i>Fatsia japonica</i>	SCP	-	91,2	100 mg·L ⁻¹	35 g·L ⁻¹ NaCl
Cones da conífera <i>Pinus resinosa</i>	SCP	-	80,64	1 g·L ⁻¹	30 g·L ⁻¹ NaCl
Extrato de manga	SCP	-	98	2% em peso	3,5% em peso de NaCl
<i>Gossypol-indole</i>	SCP	-	96	100 mg·L ⁻¹	1 M NaCl
Mucilagem de cacto	SCP	-	>90	0,5 w/v	16 g·L ⁻¹ NaCl
<i>Ricinus communis</i> (Mamona)	Argamassa	a/c = 0,5; cimento/agregados finos/agregados grossos = 1:1,2:2	87	100 ppm	3,5% em peso de NaCl
Ácido carboxílico 1	Argamassa	a/c = 0,5; cimento/areia = 1:3	96	0,1 g·L ⁻¹	3% peso cimento NaCl
Ácido carboxílico 2	Argamassa	a/c = 0,5; cimento/areia = 1:3	94	0,1 g·L ⁻¹	3% peso cimento NaCl
Ácido carboxílico 3	Argamassa	a/c = 0,5; cimento/areia = 1:3	85	0,1 g·L ⁻¹	3% peso cimento NaCl
Ácido ascórbico	Argamassa	cimento/areia/água: 1/3/0,5	97,3	0,009% em peso de cimento	3,29% em peso de cimento NaCl
Extrato de farinha de glúten de milho	Argamassa	água/cimento/areia: 0,6/1/3	99,72	3% em peso de cimento	3% peso cimento NaCl
<i>Cymbopogon citratus</i> (Capim santo)	Argamassa	a/c = 0,499; cimento/areia = 1:3	99,35	0,0833% em peso de cimento	3,5% em peso de NaCl
<i>Phyllanthus muellerianus</i>	Argamassa	-	97,58	0,333% em peso de cimento	3,5% em peso de NaCl
<i>Anthocleista djalonensis</i>	Argamassa	-	97,43	0,417% em peso de cimento	3,5% em peso de NaCl

Tabela 1: Lista de inibidores verdes (bioinibidores).

Fonte: Adaptado de Casanova *et al.* (2023).

Observa-se que a maioria dos extratos vegetais analisados demonstrou eficiência de inibição satisfatória superior a 80%, com destaque para o extrato de farinha de glúten de milho (99,72%), *Cymbopogon citratus* (Capim santo) (99,35%) e o ácido ascórbico (97,3%). Esses compostos atuam, majoritariamente, por mecanismos mistos (anódico e catódico). A diversidade nas origens dos extratos, incluindo folhas, sementes, resíduos agrícolas e frutas cítricas, evidencia o potencial sustentável da reutilização de biomassa em aplicações anticorrosivas. Além disso, os diferentes solventes e concentrações utilizados influenciam diretamente na eficiência dos compostos, apontando para a necessidade de padronização metodológica em futuras pesquisas. De modo geral, os bioinibidores demonstram ser promissoras alternativas aos inibidores sintéticos, conciliando proteção eficiente à armadura com menor impacto ambiental.

4. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada evidenciou que os bioinibidores de corrosão representam uma alternativa promissora e ambientalmente sustentável para a proteção de armaduras em estruturas de concreto armado. A obtenção desses compostos a partir de fontes naturais contribui para mitigar os impactos associados ao uso de inibidores sintéticos convencionais, como a toxicidade e o elevado custo, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e gestão responsável de recursos.

Os estudos analisados, sintetizados na Tabela 1, revelaram uma ampla variedade de extratos vegetais com potencial inibitório significativo, com destaque para compostos cuja eficiência de inibição supera 80%, sendo alguns superiores a 95%. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica dos bioinibidores como substitutos eficazes aos agentes tradicionais. Entretanto, constatou-se uma limitação recorrente quanto à disponibilidade de informações experimentais detalhadas, o que compromete a reprodutibilidade dos ensaios e dificulta a transposição dos resultados laboratoriais para aplicações em escala prática.

Verificou-se também que os bioinibidores derivados de plantas apresentam alto teor de fitoquímicos ativos, responsáveis por formar filmes protetores sobre a superfície do aço, atuando como barreiras físico-químicas contra agentes corrosivos. Contudo, a maioria dos estudos concentra-se em ensaios eletroquímicos conduzidos em soluções simuladas, sendo escassas as investigações aplicadas diretamente em argamassas ou concretos. Poucos trabalhos consideram variáveis como resistência mecânica, aderência ou durabilidade a longo prazo, o que ainda limita a consolidação desses compostos em sistemas construtivos reais.

Dessa forma, conclui-se que os bioinibidores apresentam elevado potencial para substituir os inibidores sintéticos, desde que suas aplicações sejam validadas em condições reais de exposição. Para isso, torna-se essencial o incentivo a novas pesquisas com foco em aplicações práticas, desenvolvimento de formulações compatíveis com diferentes traços de concreto e validação de desempenho em campo. Somente com o avanço dessas frentes será possível consolidar os bioinibidores como alternativas viáveis, seguras e eficazes para a proteção anticorrosiva de estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, E S J.; GANESH, G. M. A comprehensive overview on corrosion in RCC and its prevention using various green corrosion inhibitors. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1-48, 2022.
- ANITHA, R.; CHITRA, S.; VENKATESAN, H.; CHUNG, III-M.; KIM, S. Implications of eco-addition inhibitor to mitigate corrosion in reinforced steel embedded in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 246-256, 2019.
- ARGIZ, C.; ARROYO, C.; BRAVO, A.; MORAGUES, A.; ANDRADE, C.; BOLZONI, F. L-ascorbic acid as an efficient green corrosion inhibitor of steel rebars in chloride contaminated cement mortar. **Materials**, v. 15, n. 22, p. 1-19, 2022.
- ASIPITA, S. A.; ISMAIL, M.; MAJID, M. Z; MAJID, Z. A.; ABDULLAH, C.; MIRZA, J. Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 139-146, 2014.
- BEZERRA, S. R. N. **Estudo e avaliação da casca da laranja como inibidor verde no combate à corrosão em estruturas metálicas de aço carbono**. 2022. 64 f. Monografia (Monografia em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2022.
- BÖHNI, H. **Corrosion in reinforced concrete structures**. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 248p. 2005.
- CASANOVA, L.; CERIANI, F. MESSINESE, E. ; PATERLINI, L.; BERETTA, S.; BOLZONI, F. M.; BRENNI, A.; DIAMANTI, M.; ORMELLESE, M.; PEDEFERRI, M. Recent advances in the use of

green corrosion inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete. **Materials**, v. 16, n. 23, p. 1-19, 2023.

DANTAS, J. C. O.; DUPKE, A. V. A; BARRA, S. R. Bionibidores de corrosão: uma revisão. In: **Encontro da rede de cooperação em pesquisa, desenvolvimento e inovação em materiais e equipamentos**, VI. João Pessoa, 2018.

DONKOR, S.; SONG, Z.; LINHUA, J.; HONQIANG, C. An overview of computational and theoretical studies on analyzing adsorption performance of phytochemicals as metal corrosion inhibitors. **Journal of Molecular Liquids**, v. 359, p. 1-19, 2022.

GALLEGUILLOS, M.; SOLIZ, A.; CÁCERES, L.; BERGENDAHL, M.; LEIVA-GUAJARDO, S.; PORTILLO, C.; OLIVARES, D.; TORO, N.; JIMENEZ-AREVALO, V.; PÁEZ, M. Green Corrosion Inhibitors for Metal and Alloys Protection in Contact with Aqueous Saline. **Materials**, v. 17, n. 16, p. 1-41, 2024.

HARB, M. B.; ABUBSHAIT, S.; ETTEYEB, N.; KAMOUN, M.; DHOUIB, A. Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 3, p. 4846-4856, 2020.

MALINI, G.; SARANYA, B.; PARAMESWARI, A. Review on extraction techniques for medicinal and aromatic plants. **International journal of pharmaceutical chemistry and analysis**, v. 10, n. 4, p. 253–256, 2023.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 223-248, 2019.

MIRALRIO, A.; ESPINOZA V. A. Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. **Processes**, v. 8, n. 8, p. 942, 2020.

PALANISAMY, S. P.; MAHESWARAN, G.; SELVARANI, A. G.; KAMAL, C.; VENKATESH, G. Ricinus communis—A green extract for the improvement of anti-corrosion and mechanical properties of reinforcing steel in concrete in chloride media. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 376-383, 2018.

PALANISAMY, S. P.; MAHESWARAN, G.; KAMAL, C.; VENKATESH, G. Prosopis juliflora - A green corrosion inhibitor for reinforced steel in concrete. **Research on Chemical Intermediates**, v. 42, n. 12, p. 7823-7840, 2016.

RAHMANI, M. H.; DEHGHANI, A.; SALAMATI, M. BAHLEKEN, G.; RAMEZANZADEH, B. Mango extract behavior as a potent corrosion inhibitor against simulated chloride-contaminated concrete pore solution; coupled experimental and computer modeling studies. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 130, p. 368-381, 2024.

SCHMOELLER, F.; LIMA, M. G. Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão. **Concreto e Construções**, ed. 103, Jul – Set, 2021

SHEYDAEI, M. The use of plant extracts as green corrosion inhibitors: A review. **Surfaces**, v. 7, n. 2, p. 380-403, 2024.

SILVA, D. R. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade**. 2006. 194 f. Tese (Tese em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2006.

SONG, Z.; CAI, H.; LIU, Q.; JIANG, L.; CHU, H. Performance of corrosion inhibitor extracted from enzymatic hydrolysate of waste Platanus acerifolia leaves. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 111, p. 464-479, 2022.

VENKATESH, C.; MOHIDDIN, S. K.; RUBEN, N. Corrosion inhibitors behaviour on reinforced concrete - a review. **Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018**, v. 25, p. 127-134, 2019.

ZHANG, F.; CHEN, C.; HOU, R.; LI, J.; CAO, Y.; DONG, S.; LIN, C.; PAN, J. Investigation and application of mussel adhesive protein nanocomposite film-forming inhibitor for reinforced concrete engineering. **Corrosion Science**, v. 153, p. 333-340, 2019.

ZHANG, M. Davidian involucrata Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor for low carbon Steel in concrete pore solution containing chloride ions. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 16, n. 4, p. 1-19, 2021.

ZHANG, Z.; YANG, B.; TAI, B.; ZHU, Y. Effect of maize gluten meal extract as natural corrosion inhibitor on steel in mortar corroded by chloride. **Journal of Building Engineering**, v. 62, p. 1-11, 2022.