

Estudos recentes sobre compósitos de carboidratos para inibição da corrosão: uma revisão sistemática

Recent studies on carbohydrate compounds for corrosion inhibition: a systematic review

Estudios recientes sobre compuestos de carbohidratos para la inhibición de la corrosión: una revisión sistemática

Recebido: 21/06/2022 | Revisado: 01/07/2022 | Aceito: 05/07/2022 | Publicado: 14/07/2022

Maria Carolina de Paula Estevam D'Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5240-6879>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: carolina.doliveira@uft.edu.br

Emerson Adriano Guarda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0227-3881>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: emersonprof@uft.edu.br

Patrícia Martins Guarda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0937-6779>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: patriciaguarda@uft.edu.br

Salmo Moreira Sidel

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-1794>

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

E-mail: sidel@uft.edu.br

Resumo

Os biopolímeros de carboidratos constituem uma das alternativas ecológicas em relação a outros inibidores de corrosão orgânicos com potencial tóxico. Na inibição de corrosão eles representam um conjunto de compostos quimicamente estáveis, biodegradáveis e ecologicamente corretos, com forças de inibição confiáveis para proteção de superfícies metálicas, tornando-os revestimentos de proteção de metais eficazes. Portanto, este artigo apresenta uma revisão sistemática de biopolímeros de carboidratos utilizados como inibidores de corrosão desde 2018. A investigação seguiu o protocolo PRISMA, que fornece um resumo meticuloso de todas as pesquisas primárias disponíveis em resposta a uma pergunta de pesquisa. Depois de incluir/excluir etapas, quarenta e cinco estudos foram incluídos na revisão. Os resultados são apresentados enfocando os tipos de biopolímeros avaliados, como Quitosana, Dextrano, Celulose, e Goma Arábica, além disso os metais analisados, os meios utilizados para aceleração do processo de corrosão, o tipo de inibidor e a eficiência atingida em cada estudo também foram apresentados. Em suma, essa metodologia ajudou a identificar as principais lacunas de conhecimento nessa área.

Palavras-chave: Revisão sistemática; Biopolímeros; Carboidratos; Inibição da corrosão.

Abstract

Carbohydrate biopolymers are one of the ecological alternatives to other organic corrosion inhibitors with toxic potential. In corrosion inhibition, they represent a set of chemically stable and environmentally friendly coatings for protecting metal surfaces, making them effective coatings for metal protection. Thus, this article presents a systematic review of carbohydrate biopolymers used as corrosion inhibitors since 2018. The investigation followed the PRISMA statement, which provides a meticulous summary of all available primary research in response to a research question. After including/excluding steps, forty-five studies were included in the review. The results are presented with a focus on the types of biopolymers evaluated, such as chitosan, cellulose, and gum arabic. In addition, the analyzed metals, the means used to accelerate the corrosion process, the type of inhibitor and the efficiency achieved in each study were also presented. In summary, this methodology helped to identify the main knowledge gaps in this area.

Keywords: Systematic review; Biopolymers; Carbohydrates; Corrosion inhibition.

Resumen

Los biopolímeros de carbohidratos son una de las alternativas ecológicas a otros inhibidores de corrosión orgánicos con potencial tóxico. En la inhibición de la corrosión representan un conjunto de compuestos químicamente estables, biodegradables y amigables con el medio ambiente con fuerzas de inhibición confiables para proteger superficies metálicas, convirtiéndolos en recubrimientos efectivos para la protección de metales. Por lo tanto, este artículo presenta una revisión sistemática de los biopolímeros de carbohidratos utilizados como inhibidores de la corrosión

desde 2018. La investigación siguió el protocolo PRISMA, que brinda un resumen meticuloso de toda la investigación primaria disponible en respuesta a una pregunta de investigación. Después de incluir/excluir los pasos, se incluyeron cuarenta y cinco estudios en la revisión. Los resultados se presentan enfocándose en los tipos de biopolímeros evaluados, como Chitosan, Dextrano, Celulosa y Goma Arábica, además de los metales analizados, los medios utilizados para acelerar el proceso de corrosión, el tipo de inhibidor y la eficiencia alcanzada en cada uno. estudio. fueron presentados. En definitiva, esta metodología ayudó a identificar los principales vacíos de conocimiento en esta área.

Palabras clave: Revisión sistemática; Biopolímeros; Carbohidratos; Inhibición de la corrosión.

1. Introdução e Cenário Global

Estima-se que cerca de 15% a 35% do custo global provocados por corrosão podem ser economizados utilizando estratégias de proteção (Koch, 2017). Essas estatísticas revelam o importante papel dos métodos de proteção contra corrosão, a fim de melhorar a vida útil das estruturas metálicas e reduzir os custos de manutenção e reparo nas indústrias.

A corrosão ocorre devido a efetividade de alguns agentes por meio de mecanismos degradantes, sendo eles: carbonatação - transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, que é mais neutro, induzindo a redução do pH no concreto; despassivação da armadura - acontece quando o íon cloreto rompe a camada passivadora, camada insolúvel que protege o aço (Vitório, 2003).

O custo da intervenção para recuperação estrutural vai muito além dos serviços de reparo, pois envolve também a interdição do local, quando necessário, transferência de atividades para outro local, além do risco que uma estrutura danificada oferece às pessoas, materiais e equipamentos (Ribeiro & Helene, 2013).

Existem várias técnicas para proteger o aço do ataque de corrosão, como a modificação de material, alteração no ambiente circundante, revestimento superficial, proteção catódica e uso de inibidores de corrosão. Alguns métodos dependem da remoção da umidade/oxigênio, enquanto os outros fazem uso de revestimento permanente na superfície metálica. No entanto, algumas abordagens são baseadas na conversão do material anódico em um cátodo. No entanto, as aplicações das técnicas existentes são limitadas por várias restrições. Por exemplo, a modificação do material é muitas vezes impossível ou cara (Wolyne, 2003).

A substituição do ambiente de processo não é uma solução opcional em muitas aplicações industriais, pois o metal tem que experimentar um determinado meio reativo. A implementação de alguns métodos, por exemplo, o revestimento, pode elevar as emissões de CO₂ além dos níveis aceitáveis. Além disso, alguns métodos, como a proteção catódica requerem equipamentos caros, aumentando assim o custo global. Os inibidores de corrosão, no entanto, oferecem uma solução alternativa econômica e viável. (Rani & Basu, 2012).

O inibidor é a substância adicionada em pequena quantidade no ambiente corrosivo com o propósito de retardar a reação de corrosão formando uma película protetora. Os inibidores possuem inúmeras aplicações, e na construção civil servem como agentes eficazes para proteger estruturas de aço em caldeiras, trocadores de calor (óleo e gás) e recipientes de corrosão. Metais e aços, em particular, são comumente expostos a meios ácidos antes de realizar um processo, por exemplo, soldagem ou revestimento (Umoren et al., 2020).

A acidificação de estruturas corroídas (por exemplo, poços de petróleo, petroleiros, trocadores de calor, dutos) é realizada para remover produtos de corrosão. O uso de inibidores durante esses tratamentos demonstrou resultados promissores na inibição das reações de corrosão e do dano metálico associado (Darmokoesoemo et al., 2018; Farhadian et al., 2020; Umoren et al., 2020). Várias considerações essenciais determinam a seleção de inibidores, um dos fatores chave é a toxicidade do inibidor. Em geral, a alta volatilidade de inibidores tradicionais tóxicos, como cromatos, fosfatos e nitratos resulta na liberação de gases tóxicos, afetando assim o meio ambiente (Pakseresht et al., 2018; Raja & Sethuraman, 2008).

Tendo em vista os diversos problemas de corrosão identificados a partir da década de 60, muitas pesquisas foram

desenvolvidas com a tentativa de solucionar este desafio e prolongar a vida útil das estruturas das edificações (Ribeiro & Helene, 2013). Foi observado que alguns produtos, quando aplicados, preservavam a integridade do aço frente aos agentes agressivos, sendo estes os inibidores que atuam dificultando a efetividade da pilha de corrosão formada pelo aço e o eletrodo. Os inibidores são dos tipos catódicos, anódicos ou mistos possibilitando obter a inibição de corrosão do aço (Figueiredo & Meira, 2013).

Para serem efetivos os inibidores devem portar um forte receptor e/ou doador de elétrons, tem que apresentar também um certo grau de insolubilidade de forma que não seja facilmente lixiviado, deve atender ao sistema de proteção sem produzir efeitos colaterais imprevistos e também suportar e agir na presença de pH e temperatura do ambiente onde é aplicado (Ribeiro & Helene, 2013).

Os revestimentos orgânicos constituem a abordagem mais comum para a proteção da corrosão de estruturas metálicas, atuando como barreira física para separar a superfície metálica do ambiente corrosivo (Hernández-Padrón et al., 2006; Liu et al., 2018; Tran et al., 2020). No entanto, os revestimentos orgânicos não podem fornecer proteção contra corrosão a longo prazo devido à estrutura frágil e à degradação hidrolítica durante a exposição ao ambiente corrosivo. Além disso, poros são criados dentro da matriz de polímeros durante o processo de cura devido à evaporação de solventes orgânicos e tensões ambientais externas. Estes micro poros são um caminho para difusão de agentes corrosivos por meio dos revestimentos para o substrato metálico (Pourhashem et al., 2017; Ramezanzadeh et al., 2015; Skale et al., 2007; Tang et al., 2020)

Devido ao aumento da consciência ambiental e da legislação rígida, nos últimos anos tem havido uma tendência crescente de usar abordagens verdes caracterizadas por uma carga ambiental mínima. Eles trabalham com os princípios da química verde, que incluem a prevenção de resíduos; economia atômica; síntese química perigosa reduzida; projetar produtos químicos mais seguros; solventes e auxiliares mais seguros; design para eficiência energética; uso de matérias-primas renováveis; reduzir derivados; uso de catalisadores em vez de reagentes estequiométricos; design para degradação; prevenção da poluição em tempo real; química mais segura para a prevenção de acidentes (Wei et al., 2020).

Os inibidores de corrosão verdes têm atraído mais atenção nos últimos anos como uma técnica eficaz e ecológica. São fontes comuns de inibidores ecológicos de corrosão os extratos de plantas, as drogas farmacêuticas, os líquidos iônicos e os inibidores sintéticos. As plantas (ou seja, extrato e óleos) são fonte essencial da extensa gama de inibidores de corrosão verde em diferentes meios ácidos devido às propriedades físicas, químicas e biológicas. Outras vantagens das plantas como fontes de inibidores de corrosão incluem baixo custo, disponibilidade abundante e sua biodegradabilidade. As plantas são conhecidas como uma fonte rica em compostos químicos naturais que podem ser facilmente extraídos com baixo custo e mínima poluição ambiental (Marzorati et al., 2019; Sharma et al., 2015).

Os biopolímeros são polímeros produzidos por seres vivos, como a celulose, o amido, a quitina, a quitosana e os alginatos. Devido sua decomposição rápida, em condições favoráveis, os biopolímeros são uma das principais alternativas aos materiais plásticos derivados do petróleo. Muitos estudos estão ocorrendo na área a fim de viabilizar seu uso como produto final em diversas aplicações, pois essa classe de polímeros apresenta um grande potencial de substituição para os polímeros obtidos a partir de fontes fósseis (Avérous & Pollet, 2012).

Biopolímeros de carboidratos são macro compostos que possuem unidades monoméricas ligadas covalentemente para formar longas cadeias de açúcar macromoleculares, com massas moleculares relativamente altas. Eles estão prontamente disponíveis na natureza, são benignos, renováveis e uma alternativa ecológica a outros inibidores orgânicos com potencial tóxico. Na inibição de corrosão, eles representam um conjunto de compostos quimicamente estáveis, biodegradáveis e ecologicamente corretos, com forças de inibição confiáveis para proteção de superfícies metálicas, tornando-os revestimentos de proteção e de metal eficazes (Umoren & Eduok, 2016).

Os principais polissacarídeos de interesse comercial são celulose e amido, havendo uma atenção especial aos

carboidratos mais complexos: quitosanas, quitinas e xantanas. Comparando-se as estruturas de alguns destes polímeros, verifica-se que são formados por unidades básicas de glicose, ligadas como anéis de grupos acetais (aldeído e álcool) e, portanto, com grande quantidade de grupos hidroxilas (alta hidrofiliçidade) (Franchetti & Marconato, 2006).

Os biopolímeros possuem algumas limitações técnicas que tornam difícil sua processabilidade e seu uso como produto final. Assim, muitos grupos de pesquisa vêm se dedicando ao estudo da modificação dos biopolímeros para viabilizar o processamento e uso deles em diversas aplicações. Para isso, blendas, compósitos, nanocompósitos, têm sido estudados no intuito de melhorar propriedades como processabilidade, resistência térmica, propriedades mecânicas, propriedades reológicas, permeabilidade a gases e taxa de degradação (Brito et al., 2011).

O objetivo deste artigo é discutir trabalhos após uma revisão sistemática, utilizando o protocolo PRISMA, para acompanhar o progresso recente no uso de biopolímeros de carboidratos para inibição da corrosão de metais. Os biopolímeros avaliados, os metais analisados, os meios utilizados para aceleração do processo de corrosão, o tipo de inibidor, o método de monitoramento da corrosão e a eficiência atingida em cada estudo analisados são detalhados nas seções a seguir.

2. Revisão Sistemática e Metodologia

Uma Revisão Sistemática de Literatura procura estabelecer um levantamento formal do estado da arte de forma consistente e planejada, visando implementar critérios para seleção de pesquisas que possam ser úteis e trazer informações relevantes sobre o assunto em estudo, sendo uma estratégia para reduzir predisposições e erros aleatórios que podem ocorrer em uma revisão tradicional (Urra Medina & Barría Pailaquilén, 2010). Além disso, consiste na identificação e descrição de pesquisas anteriores, avaliação sistemática de pesquisas seguindo protocolos rigorosos, e coleta sintética e coerente de evidências no universo de pesquisas selecionado (O'Connor et al., 2017). Ferramentas facilitadoras para a realização da revisão sistemática de literatura são empregadas, como o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses), que possui 17 diretrizes compondo um fluxograma de informações (Moher et al., 2015).

Diferente de uma revisão de literatura, que é baseada em um resumo ou visão geral de um determinado tópico, uma revisão sistemática de literatura é focada na resposta de uma questão, eliminando os vieses e preconceitos. Além disso, é importante salientar que o planejamento que ocorre antes da revisão permite que outros comparem, reproduzam e julguem a validade do protocolo e da revisão, prevenindo assim decisões arbitrárias com relação à inclusão e exclusão de dados (Moher et al., 2015; O'Connor et al., 2017).

Na área de biopolímeros de carboidratos, não há uma revisão sistemática de literatura que siga ou adapte a metodologia PRISMA, principalmente no que tange ao uso como inibidores de corrosão, sendo que a única revisão sistemática encontrada está relacionada a compósitos epóxi de celulose com foco em fibras vegetais (Neves et al., 2021).

Artigos de revisão de literatura vem sendo publicados sobre o uso da quitosana como inibidor de corrosão (Ashassi-Sorkhabi & Kazempour, 2020; Azmana et al., 2021) e na indústria do petróleo e gás (Chauhan et al., 2021; Negi et al., 2021); e da goma arábica como material anticorrosivo (Verma & Quraishi, 2021). Tais artigos discutem profundamente estes tópicos. Porém, a vantagem deste trabalho é permitir, com facilidade, a verificação e rastreamento do que foi publicado desde 2018 até a presente data em compósitos de carboidratos com foco no uso como inibidores de corrosão.

Nesse contexto, o objetivo desta revisão sistemática é compilar dados entre 2018 e 2021, sobre compósitos de carboidratos utilizados como inibidores de corrosão, sendo que, este trabalho, foi realizado seguindo as diretrizes metodológicas definidas pelo protocolo PRISMA (Moher et al., 2015), e o software Mendeley© foi utilizado para organizar os resultados de acordo com cada uma das bases de dados e também auxiliou na organização dos dados facilitando o processo laborioso e repetitivo de uma revisão sistemática de literatura.

Os artigos foram selecionados por meio das bases de dados on line: PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>),

PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>), Web of science (<https://www.sciencedirect.com/>) e Periódicos da CAPES (www.periodicos.capes.gov.br). Os termos de pesquisa foram: (Biopolymer AND Carbohydrate AND Corrosion inhibitor). Os resultados foram limitados a artigos em inglês publicados entre 2018-2021. Os artigos identificados tiveram seus títulos e resumos avaliados de forma independente por dois revisores (D'Oliveira, MCPE e Guarda, EA).

Foram excluídos os artigos de revisão, livros e capítulos de livros, resumos de congressos e estudos de caso.

Para a etapa seguinte foi utilizado o conceito Qualis CAPES que é um sistema de classificação de produção científica brasileira, baseada nos artigos publicados em periódicos de todos os programas de pós-graduações do país onde o principal objetivo é avaliar a qualidade da produção científica e auxiliar os professores e alunos no processo de submissão de artigos, sendo que essa qualidade é classificada em artigos A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4 e C.

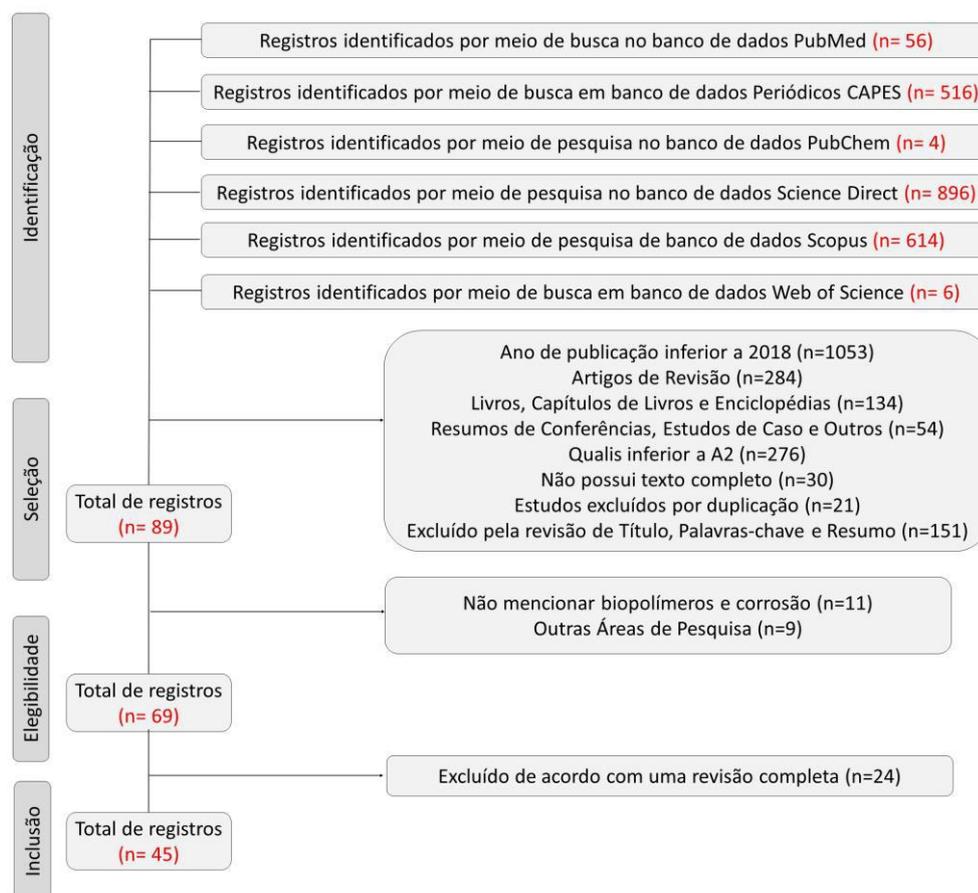
Em seguida foram aplicados os seguintes critérios de exclusão: artigos com Qualis inferior a A2, trabalhos que não mencionavam biopolímeros de carboidratos e inibidores de corrosão, trabalhos sem texto completo. Os artigos foram incluídos, comparados e os registros duplicados foram removidos, alcançando um número final de 45 artigos de interesse.

É importante salientar que esta pesquisa irá relacionar os tipos de biopolímeros avaliados, os metais analisados, os meios utilizados para aceleração do processo de corrosão, o tipo de inibidor, o método de monitoramento da corrosão e a eficiência atingida em cada estudo; não está incluída a discussão dos ensaios de caracterização dos materiais.

3. Resultados e Coleta de Dados

A seleção dos estudos é apresentada em um fluxograma de acordo com os requisitos do PRISMA (Figura 1), ilustrando o número de artigos identificados, incluídos e excluídos, evidenciando o motivo. A busca nas bases de dados on line PubMed, Science Direct, Periódicos da CAPES, Scopus e Web of Science identificou um total de 2092 artigos. Destes, foram excluídos artigos cujo ano da publicação é inferior a 2018 (1053), artigos de revisão (284), livros, capítulos de livro e enciclopédias (134), resumos de congressos e estudos de caso (54), aqueles cujo Qualis é inferior a A2 (276), os que não possuem texto completo disponível (30), excluídos por duplicação (21) e os excluídos após a revisão do título, palavras-chave e resumo (151), chegando a 89 artigos.

Figura 1. Fluxograma de revisão sistemática, de acordo com o protocolo PRISMA.



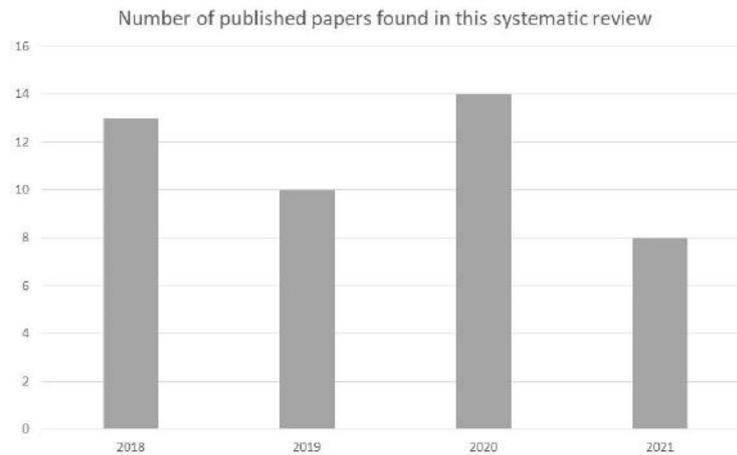
Fonte: Autores.

Também foram excluídos aqueles artigos que não mencionam biopolímeros e corrosão (11) e os de outras áreas de pesquisa (9). Após esta etapa, permaneceram 69 artigos dos quais 24 foram excluídos após uma revisão integral do texto. Desta maneira, 45 artigos foram submetidos à análise de texto completo e incluídos nesta pesquisa.

4. Discussão de Resultados

Com base na Figura 2, pode-se observar que o número de artigos foi maior em 2018. No ano de 2021, até julho, quando os dados foram compilados, já existiam 8 trabalhos nessa área, e mais estudos são esperados, o que indica que no ano de 2021 haverá mais publicações que nos anos anteriores sobre o assunto pesquisado. A revisão sistemática permitiu rastrear quais os tipos de compósitos de carboidratos foram estudados, os tipos de metais avaliados, o meio aquoso utilizado no processo de aceleração da corrosão, o tipo de inibidor, o método de monitoramento da corrosão e a eficiência de cada compósito de carboidrato como inibidor de corrosão.

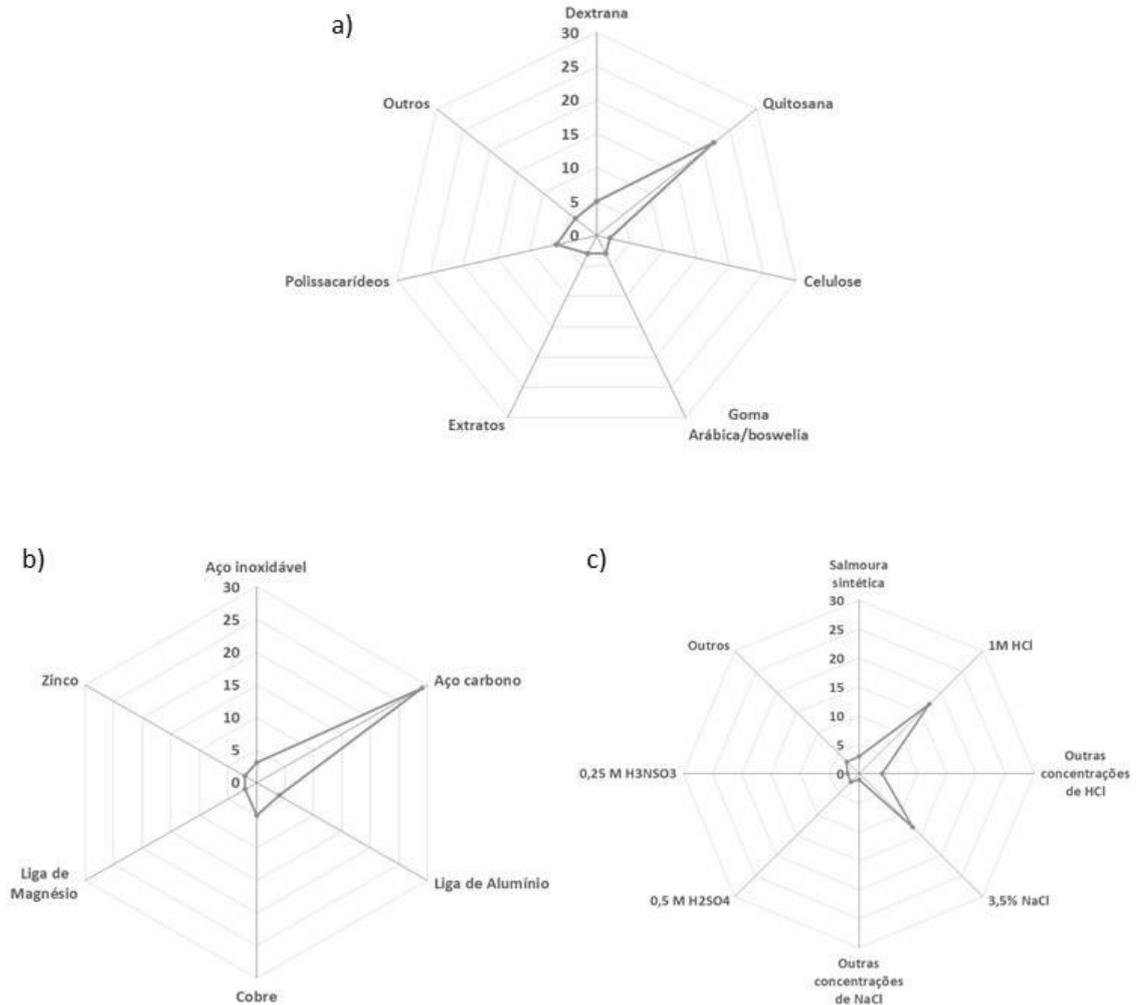
Figura 2. Estudos publicados encontrados nesta revisão sistemática sobre biopolímeros de carboidratos, por ano, desde 2018.



Fonte: Autores.

Os artigos foram classificados com base no biopolímero foco da pesquisa, metais utilizados para avaliação da corrosão e meio utilizado para aceleração da corrosão nos estudos analisados, e isso está ilustrado na Figura 3. Em relação ao biopolímero estudado, a maioria dos artigos utilizaram a quitosana, seguido da dextrana. Outros biopolímeros estudados desde 2018 foram a celulose, a goma arábica e alguns compostos por polissacarídeos e extratos.

Figura 3. Tipo de biopolímeros, metais, meio de imersão e eficiência alcançada relatado nos estudos desde 2018. (a) tipos de biopolímeros estudados; (b) metais utilizados; (c) meios de imersão do metal para aceleração da corrosão.

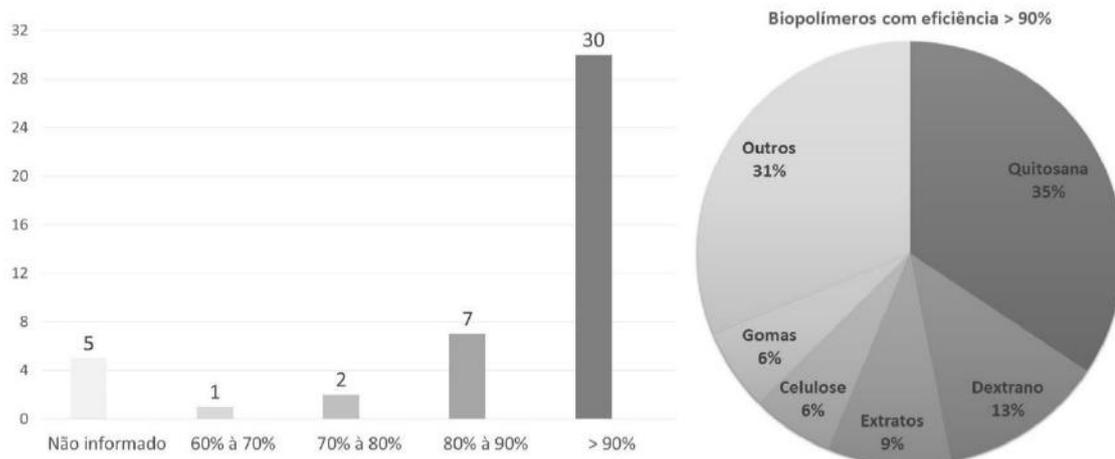


Fonte: Autores.

Em relação aos tipos de biopolímeros analisados nos artigos, 49% deles utilizaram a quitosana pura ou modificada, 11% eram compósitos de dextrana. Gomas, celulose, extratos e polissacarídeos foram menos utilizados (Figura 3a). O metal mais utilizado nas pesquisas foi o aço carbono, 64%, seguido do cobre, 11%. As ligas de alumínio e magnésio, o zinco e o aço inoxidável também foram abordados em uma quantidade menor de artigos (Figura 3b). Os meios de imersão do metal para aceleração da corrosão mais utilizados foram 1M HCl e 3,5% de NaCl, com 38% e 29%, respectivamente, em menor quantidade apareceram meios aquosos com H2SO4, H3NSO3 além da salmoura sintética (Figura 3c).

A eficiência como inibidores de corrosão alcançadas nos estudos e os biopolímeros mais eficientes estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4. Eficiência alcançada e biopolímeros mais eficientes relatados nos estudos desde 2018.



Fonte: Autores.

Em relação a análise da eficiência dos biopolímeros como inibidores de corrosão, a grande maioria dos artigos, 30, apresentaram uma eficiência de inibição de corrosão superior a 90%, sendo que destes, o biopolímero mais estudado foi a quitosana, 11 estudos, seguido da dextrana com 4 estudos, celulose, 2 estudos, e gomas, 2 estudos (Figura 4).

Os referidos 45 artigos incluídos na síntese qualitativa, o tipo de biopolímero e a eficiência destes como inibidores de corrosão são apresentados no Quadro 1. As informações completas, incluindo tipo de metal, o meio utilizado para aceleração da corrosão, o tipo de inibidor, o método de monitoramento da corrosão e os resultados relatados pelos 45 artigos, podem ser encontrados no Material Suplementar (Tabela S1) e indicam os recentes desenvolvimentos na área de pesquisa em questão.

Quadro 1. Tipo de biopolímero e eficiência como inibidores de corrosão.

ID	REFERÊNCIA	BIOPOLÍMERO ESTUDADO	EFICIÊNCIA
1	(Rbaa et al., 2020)	CH-HQ 5-clorometil-8-hidroxiquinolina (5-CMHQ) quitosana (CH)	CH, 78% CH-HQ, 93%
2	(Chugh, Singh, Chaouiki, et al., 2020)	BPCH MBPCH CBPCH Sintetizados benzaldeído, 2-metoxibenzaldeído 2-clorobenzaldeído	MBPCH, 94,1% BPCH, 91,3% CBPCH, 78,5%
3	(K. Zhang, Yang, Yin, et al., 2018)	KGMA - Pó de konjac comercial KGMH - Polímeros de carboidratos modificados com aminoácidos	KGMA, 90% KGMH, 92%
4	(Chauhan et al., 2020)	aminotriazoletiol-quitosana	97,80%
5	(Yang et al., 2019)	beta-ciclodextrina carboximetilada (CM-b-CD)	99,20%
6	(W. Zhang, Wu, et al., 2021)	polissacarídeo de <i>Apostichopus japonicus</i> (AJPS)	96,03%
7	(Fardioui et al., 2021)	8-hidroxiquinolina- g- Alginato	92,60%
8	(Biswas et al., 2019)	dextrin- enxerto -polyvinyl de etilo (ViciadosMu-g-PVAC)	98,39%
9	(Mobin et al., 2018)	goma <i>Boswellia serrata</i> (BSG)	91,80%
10	(Oliveira et al., 2020)	quitosana-tungstênio (Chit-W)	não houve melhora significativa na resistência à corrosão
11	(Srivastava et al., 2019)	quitosana-cobalto quitosana-SnS 2	quitosana-cobalto, 95%
12	(Lai et al., 2021)	CP foi preparado pela reação de Schiff Base com quitosana e 4-piridinocarboxaldeído. TiO 2foi disperso em CP para preparar nanocompósito de CPT.	94,50%
13	(Zhao et al., 2020)	CHC CAHC	CHC, 87,97% CAHC, 93,95%
14	(Bahari et al., 2020)	matriz de quitosana com 2-MBT e nanopartículas de sílica	85%

ID	REFERÊNCIA	BIOPOLÍMERO ESTUDADO	EFICIÊNCIA
15	(Cui et al., 2019)	sal de amônio quaternário de oligossacarídeo N-propil quitosana (PHC) sal de amônio quaternário de N-benzil quitosana (BHC)	PHC, 85,70% BHC, 88,59%
16	(El Mouaden et al., 2018)	Quitosana	89%
17	(Ansari et al., 2020)	Salicylaldeyde-Chitosan Schiff Base (SCSB), foi sintetizada pela reação de quitosana e salicilaldeído	95,40%
18	(Gupta et al., 2018)	quitosana como inibidor de corrosão sozinho e em combinação com iodeto de potássio)	Quitosana, 73,8% Quitosana com KI, 90%
19	(EL. Mouaden et al., 2020)	quitosana modificada por cinamaldeído (Cinn-CS).	89%
20	(Q. H. Zhang et al., 2021)	L-cisteína e S-benzil-L-cisteína foram usados como reagentes de esterificação para modificar a molécula de dextrano para obter dois inibidores ecológicos (LDT e S-LDT)	S-LDT, 99,7%
21	(Eduok et al., 2018)	Composto de carboximetilquitosana grafitizado com PVI (CMCh-g-PVI)	não informado
22	(Sambyal et al., 2018)	compósito de poli (anilina-anisidina), quitosana e SiO ₂	não informado
23	(Hasanin & Al Kiey, 2020)	compósito de etilcelulose-niacina (NEC)	NEC, 94,7%
		compósito de celulose-niacina microcristalina (NMCC)	NMCC, 33,2%
		composto de carboximetilcelulose-niacina (NMC)	NMC, 83,4%
24	(Nikpour et al., 2019)	Extrato da folha de Eriobotrya japonica Lindl (EJL)	de 85 à 95%
25	(Solomon, Umoren, et al., 2018)	Dextrano, incorporação de nanopartículas de prata (AgNPs) em matrizes de dextrano e combinação com KI 1 mM	Dextrano, 86,82% combinação com KI, 94,21%
26	(Umoren et al., 2020)	alginate de sódio (ALG), hidroxietilcelulose (HEC)	HEC, 80,56% ALG, 77,43%
27	(W. Zhang et al., 2020)	Extrato de Polygonatum cyrtonema Hua (PF) ácido poliaspártico ecológico (PASP)	94,73%
28	(Chai et al., 2018)	PASP / N - (3-aminopropil) imidazol (PD-1) PASP / N - (3-aminopropil) -imidazol- co-n- dodecilamina (PD-2)	PD-2, 94%
29	(Pais et al., 2021)	Nanopartículas de glicogênio	92%
30	(Jena et al., 2020)	composto Óxido de grafeno - quitosana - prata	99%
31	(Rbaa et al., 2021)	macromolécula de oligossacarídeo de quitosana carregando uma porção de glicose (COS-g-Glu)	97%
32	(Shen et al., 2019)	goma arábica	83,5 à 90%
33	(Solomon, Gerengi, et al., 2018)	goma arábica, nanopartículas de prata e mel natural (GA-AgNPs)	em soluções de HCl, 88,60% em soluções de H ₂ SO ₄ , 84,54%
34	(W. Zhang, Nie, et al., 2021)	polissacarídeo natural composto de sulfato de condroitina derivado de cartilagem de porco (CS-PC) e alginate de sódio (SA)	95,18%
35	(K. Zhang, Yang, Xu, et al., 2018)	konjac glucomanan	94%
36	(Hassan et al., 2018)	polissacarídeo aniônico polieletrólito condroitina-4-sulfato (CS)	64,12%
37	(Pais & Rao, 2020)	maltodextrina	72%
38	(Farhadian et al., 2021)	Hidroxietilcelulose modificada	93%
39	(Charitha & Rao, 2018)	Pullulan (polissacarídeo fúngico)	89%
40	(Chugh, Singh, Poddar, et al., 2020)	cinco diferentes bases de Schiff de cinamaldeído de quitosana (Chi-Cn1-5) usando quitosana e cinamaldeído como unidades monoméricas	não informado
41	(Nadi et al., 2019)	extrato de algas marinhas invasivas Sargassum muticum (ESM)	97%
42	(Pozzo et al., 2019)	revestimentos de quitosana pura e de quitosana	não informado
43	(Chauhan et al., 2018)	Quitosana funcionalizada com tiosemicarbazida e tiocarbo-hidrazida	92%
44	(Chauhan et al., 2019)	modificação química da quitosana usando 4-amino-5-metil-1,2,4-triazol-3-tiol.	95%
45	(Macedo et al., 2019)	Carboximetilquitosana (CMC)	67% à 80%

Fonte: Autores.

4.1 Quitosana

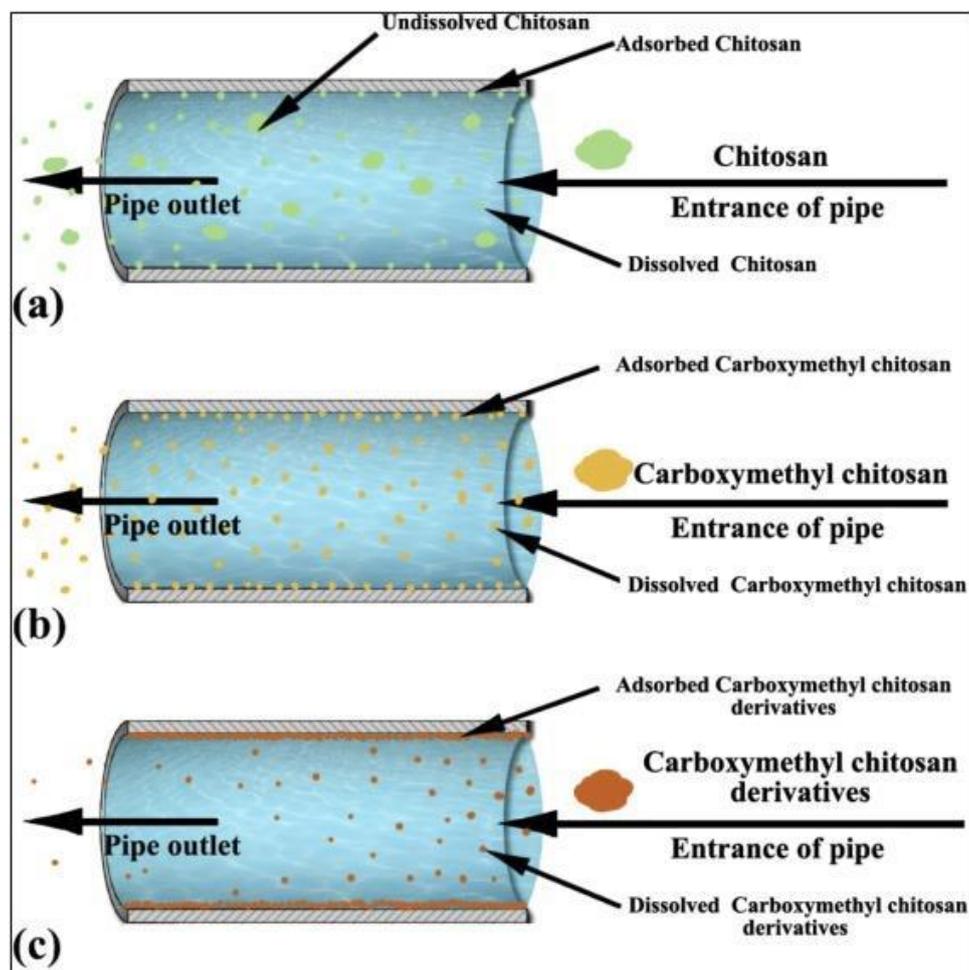
A quitosana é um biopolímero de ocorrência natural, podendo ser obtido como produto da reação de desacetilação alcalina da quitina, que é um polissacarídeo encontrado nas cascas de crustáceos, paredes celulares de fungos e cutículas de insetos (Giuliani et al., 2018; Heise et al., 2017). Devido suas propriedades como biocompatibilidade, atividade antibacteriana, não toxicidade, biodegradabilidade e capacidade de formar bons filmes, a quitosana tem despertado o interesse da comunidade científica nos últimos anos (Clifford et al., 2018; Gebhardt et al., 2012). Assim, os revestimentos à base de quitosana podem ser aplicados em diversos setores, como na produção de materiais biomédicos, biossensores, indústria alimentícia, indústria têxtil e cosmética, entre outras aplicações (Carneiro et al., 2015; Clavijo et al., 2016).

Em geral, os polímeros da família dos polissacarídeos são considerados como potenciais inibidores naturais devido seus sítios ativos que interagem com os íons metálicos na solução (Luo et al., 2019; Umoren et al., 2018a). Entre eles, a quitosana é um polissacarídeo adequado como inibidor verde de aço macio e liga de alumínio no meio corrosivo (Ashassi-Sorkhabi & Kazempour, 2020), devido ao seu maior número de locais de adsorção e compatibilidade ecológica (An et al., 2015; Sangeetha et al., 2015). O mecanismo de inibição de corrosão da quitosana e seus derivados está ilustrado na Figura 5.

Apesar de suas vantagens, a baixa solubilidade em água da quitosana limita seu uso como um inibidor de corrosão (Figura 5a). A carboximetilquitosana, como um derivado da quitosana, resolve o problema de solubilidade em água, ao mesmo tempo que retém o número de locais de adsorção na quitosana, que podem obter um melhor efeito protetor (Figura 5b) (El Mouaden et al., 2018).

A carboximetilquitosana foi modificada e dois derivados da carboximetilquitosana foram preparados pela adição de amônio quaternário e grupos de base de Schiff. Experimentos eletroquímicos e de perda de peso foram usados para testar o efeito dos inibidores de corrosão, enquanto SEM-EDS, AFM foram usados para estudar o mecanismo de proteção dos inibidores de corrosão. Os resultados teóricos e práticos mostram que os derivados sintéticos podem adsorver melhor na superfície do metal e formar uma película protetora mais forte (Figura 5c). Foi feita a análise da corrosão por dióxido de carbono do aço P110 em 3,6% em peso de solução de NaCl a 80 °C. Na concentração de 100 mg.L⁻¹, CHC e CAHC atingiram eficiências de inibição máximas de 87,97% e 93,95%, respectivamente. Além disso, comparando o potencial de corrosão antes e depois da adição de inibidores, o desvio máximo do CHC é 48 mV, enquanto o do CAHC é 36 mV. Seja na direção do cátodo ou na direção do ânodo, o deslocamento do potencial de corrosão é inferior a 85 mV, o que pode ser uma forte evidência de CHC e CAHC pertencentes a inibidores de corrosão de tipo misto. (Zhao et al., 2020).

Figura 5. Mecanismo de inibição da corrosão da quitosana e seus derivados.



Fonte: El Mouaden et al. (2018)

A copolimerização, em particular, é uma ferramenta de modificação química que permite a introdução de cadeias de polímero solúvel em água na quitosana, e os novos produtos compostos de polímero híbrido resultantes possuem propriedades físicas e químicas inteiramente novas para uma ampla gama de aplicações potenciais (El-Sherbiny et al., 2005; Joshi & Sinha, 2007).

O enxerto de poli (vinil imidazol) na cadeia molecular de carboximetilquitosana (CMCh), foi avaliado como um inibidor de corrosão para o aço API X70 em 1 M HCl. O compósito CMCh-g-PVI reduziu significativamente a corrosão do aço X70 quando comparado com a concentração equimolar de quitosana e carboximetilquitosana no mesmo meio devido à formação de filmes poliméricos de proteção estáveis na superfície do metal (Eduok et al., 2018).

Avaliaram o comportamento de uma carboximetilquitosana (CMC) hidrossolúvel como inibidor preventivo dos processos de corrosão em dutos de aço carbono 1020, utilizados nas instalações de poços de petróleo, considerando a alta salinidade no meio de 3,5% NaCl, sem qualquer adição de ácido ou base. CMC mostrou boas propriedades como inibidor de corrosão em meios onde continha cloreto, e se comportou como um inibidor anódico. A CMC exibiu eficiência inibitória em torno de 80% e 67%, de acordo com a curva de Tafel e impedância eletroquímica, respectivamente, a qual foi atribuída ao mecanismo de quimissorção. (Macedo et al., 2019).

Sambyal et al. (2018) desenvolveram um revestimento composto para proteção contra corrosão do aço carbono em ambiente marinho, utilizando o processo de polimerização química oxidativa in situ para sintetizar poli (anilina-anisidina) /quitosSiO₂ em meio aquoso NaCl 3,5%. As medições eletroquímicas demonstraram claramente uma excelente melhoria nas

propriedades de resistência à corrosão do substrato após a aplicação de revestimentos.

O teste de pulverização de sal revelou que os revestimentos compostos podem resistir sob condições de corrosão acelerada de alto teor de sal e umidade por períodos prolongados. A melhora na resistência à corrosão dos revestimentos compostos é atribuída à combinação eficaz de enchimentos (SiO₂ nanopartículas), biopolímero (quitosana) em matriz condutora (poli (anilina-anisidina)) (Sambyal et al., 2018).

Os revestimentos de quitosana atuam como uma barreira física e fornecem proteção contra a corrosão, retardando a difusão de espécies corrosivas através do revestimento e inibindo a transferência de carga entre locais anódicos e catódicos (Carneiro et al., 2013). Portanto, a modificação da quitosana para aumentar sua rigidez e obter propriedade de barreira superior melhoraria suas propriedades anticorrosão.

A quitosana pode ser auto reticulada ligando uma molécula a outra com reticuladores como tripolifosfato (TPP) para ligação iônica ou glutaraldeído (GA) para ligações covalentes (Umoren et al., 2020). Os inibidores de corrosão, sejam inorgânicos ou orgânicos, são comumente usados em revestimentos de proteção para minimizar a degradação da corrosão de substratos metálicos (Izadi et al., 2018). Eles podem retardar a taxa de corrosão afetando o processo de corrosão das reações anódicas, onde os íons metálicos se difundem para a solução a partir do ânodo, reduzindo as reações catódicas, onde os elétrons fluem do metal para um aceptor. Portanto, exceto o aglutinante e o enchimento que têm impacto nas propriedades de barreira dos revestimentos, os inibidores de corrosão também podem ajudar a reduzir a possibilidade de ocorrência de reações redox na interface metal/solução.

Foi desenvolvido por Bahari et al. (2020) um revestimento nanocompósitos à base de quitosana para proteção anticorrosiva de cobre. A superfície de cobre foi primeiro preparada com ácido mercaptocarboxílico para facilitar a formação de revestimentos de quitosana no cobre por meio da interação de ácido carboxílico e grupos amina através da automontagem. Para testar os efeitos do enchimento inorgânico, inibidor de corrosão, bem como a reticulação da matriz polimérica na proteção corrosiva do cobre, diferentes revestimentos empregando aglutinante de quitosana à base de água com uma variedade de composições contendo inibidor de corrosão bem conhecido, 2-mercaptobenzotiazol (MBT), e NPs de sílica em matrizes de quitosana não reticulada e reticulada com GA foram desenvolvidas e aplicadas a placas de cobre.

Os efeitos sinérgicos de diferentes composições e suas porcentagens em peso no revestimento foram estudados para estabelecer sua influência na eficiência de inibição de corrosão, além da aplicação na prevenção de corrosão. Verificou-se que após a reticulação dos revestimentos de quitosana, uma maior resistência à corrosão poderia ser alcançada e a maior eficiência de inibição para revestimentos de nanocompósitos de quitosana é calculada como 85%, mostra a eficiência aprimorada do nanocompósito e o potencial dos revestimentos de quitosana na prevenção da corrosão do cobre (Bahari et al., 2020).

Quitosana (CS) foi reticulada utilizando cinamaldeído (Cinn) em um procedimento de etapa única após irradiação de microondas para produzir quitosana modificada por cinamaldeído (Cinn-CS). O Cinn-CS sintetizado foi usado como um novo inibidor de corrosão para cobre em ácido clorídrico 1 M.L-1. O inibidor Cinn-CS funcionou por adsorção na superfície do cobre e mostrou uma eficiência de inibição de > 89% na dose de 1000 mg.L-1, além de exibir um tipo misto de desempenho de inibição com natureza catódica. (EL. Mouaden et al., 2020).

Foi investigada a influência do grau de reticulação de revestimentos de quitosana, reticulada com genipina, na proteção contra corrosão da liga de magnésio AZ31 em um fluido corporal simulado (SBF). Os revestimentos de quitosana pura e de quitosana reticulada com 1 mmol de genipina são eficientes na proteção da <https://www-scienceirect.ez6.periodicos.capes.gov.br/topics/materials-science/magnesium-alloysAZ31> da corrosão em SBF, porém os resultados obtidos usando uma solução de NaCl a 3,5% em peso, mostram que um aumento no grau de reticulação não é benéfico para o nível de proteção dos revestimentos em SBF, sendo que revestimentos de quitosana com grau de reticulação de até 42% são eficientes na proteção da liga em SBF, com desempenho superior a revestimentos semelhantes relatados na

literatura. Com graus de reticulação mais elevados, o revestimento torna-se frágil e suscetível a rachaduras, diminuindo suas propriedades protetoras (Pozzo et al., 2019).

A quitosana pode ser degradada em oligossacarídeos de quitosana solúveis em água de baixo peso molecular por peróxido de hidrogênio (Chang et al., 2001), quitinas e (Sørbotten et al., 2005) e peroxotungstato (Ma et al., 2014).

Cui et al., 2019, avaliaram oligossacarídeos de quitosana com boa solubilidade em água como material de partida e sintetizaram dois derivados de oligossacarídeos de quitosana, sal de amônio quaternário de oligossacarídeo N-propil quitosana (PHC) e sal de amônio quaternário de N-benzil quitosana (BHC) para proteger o aço P110 em uma solução saturada de CO₂ com 3,5% em peso de NaCl à 80 °C. A eficiência da inibição aumentou conforme a concentração do inibidor aumentou. Nas concentrações de PHC e BHC de 100 mg.L⁻¹, as eficiências de inibição foram 85,70% e 88,59%, respectivamente. Medições de energia dispersiva de raios-X (EDX), ângulo de contato e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) mostraram que os inibidores foram adsorvidos com sucesso à superfície do aço P110. Os resultados da polarização potenciodinâmica indicaram que ambos os compostos eram inibidores do tipo misto.

Uma alternativa é realizar a funcionalização química da quitosana e usá-lo como um inibidor de corrosão. A base de Schiff sintetizada é um composto químico seguro e ambientalmente benigno de acordo com as diretrizes do PARCOM, a presença de ligação imina ($-HC = N$) pode aumentar sua adsorção e efeito de inibição de corrosão (Antony et al., 2019; Singh et al., 2019) e é muito mais solúvel em comparação com a quitosana não modificada (Anush et al., 2018; Baran & Menteş, 2015).

Uma base de Schiff de quitosana foi sintetizada pela reação do quitosana com salicilaldeído (SCSB) como um inibidor da corrosão para o aço J55 em CO₂ saturado 3,5% de NaCl, a 65 °C. O efeito de inibição da corrosão foi analisado usando métodos de perda de peso, espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e polarização potenciodinâmica (PDP). Os resultados do PDP revelaram que o SCSB atua como um inibidor de tipo misto e reduz o processo de corrosão efetivamente a 150 mg.L⁻¹ de concentração com uma eficiência de inibição de 95,2% e taxa de corrosão de 0,444 mm/ano. (Ansari et al., 2020).

Foram sintetizadas cinco diferentes bases de Schiff de cinamaldeído de quitosana (Chi-Cn1-5) usando quitosana e cinamaldeído como unidades monoméricas, variando o grau de substituição (0,73 mL para Chi-Cn1; 1,46 mL para Chi-Cn2; 2,19 mL para Chi-Cn3; 2,92 mL para Chi-Cn4; 3,65 mL para Chi-Cn5), em 0,5M H₂SO₄. A propriedade anticorrosiva dos biopolímeros foi analisada por Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia dispersiva de energia (SEM-EDS), microscopia de força atômica (AFM), microscopia eletroquímica de varredura (SECM) e espectroscopia de fotoelétrons de raios-X (XPS). Os resultados mostraram que o Chi-Cn5 tem um desempenho melhor contra a corrosão do aço-carbono em meio ácido entre todos os outros biopolímeros devido ao seu grau máximo de substituição (Chugh, Singh, Poddar, et al., 2020).

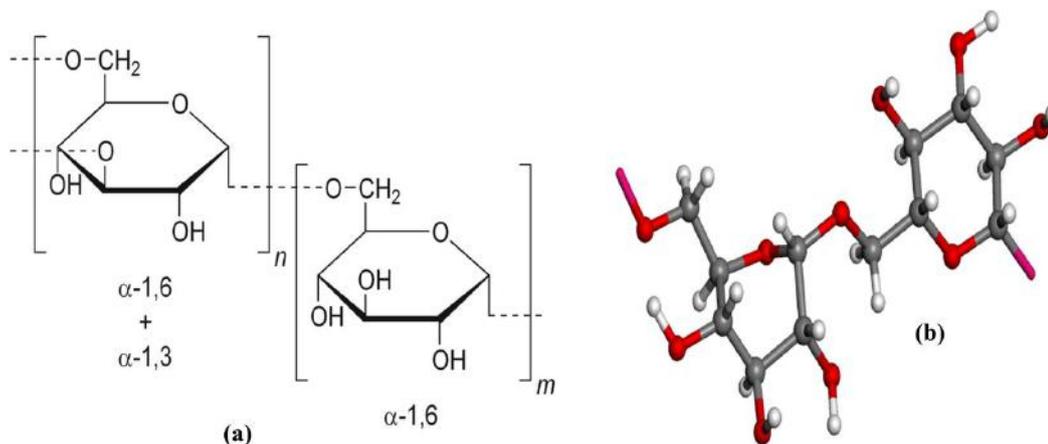
4.2 Dextrano e dextrina

O Dextrano (DT), como um recurso renovável no ecossistema, está amplamente presente em vários fungos e plantas, como cogumelos, leveduras e aveia. Devido sua biocompatibilidade e estabilidade química, o dextrano e seus derivados são amplamente aplicados nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Recentemente, alguns pesquisadores tentaram usar o dextrano como inibidores ecológicos, considerando sua forte afinidade, boa solubilidade e capacidade de adsorção em superfícies metálicas (Charitha et al., 2017; Solomon, Umoren, et al., 2018; Umoren et al., 2020; Umoren & Eduok, 2016).

Dextrano é um polissacarídeo que consiste em cadeias de comprimentos variados de α -D-pirano. A cadeia linear contém ligações α -1,6 glicosídicas entre as moléculas de glicose e os ramos começam nas ligações α -1,3, conforme ilustrado na Figura 6a. Esta ramificação única o distingue de uma dextrina, um polímero de glicose de cadeia linear ligado por ligações α -1,4 ou α -1,6. O dextrano contém vários heteroátomos de oxigênio, conforme ilustrado na Figura 6b, cumprindo assim um

dos requisitos essenciais para um inibidor de corrosão de metal.

Figura 6. (a) A estrutura química do dextrano e (b) Modelo de bola e bastão da molécula de dextrano (o heteroátomo que poderia servir como possível local de adsorção é pintado de vermelho).



Fonte: Adaptado de Q. H. Zhang et al. (2021)

Foi avaliado o uso de dois derivados de dextrana modificados por aminoácidos (LDT e S-LDT), como inibidores de corrosão para aço carbono em uma simulação de água produzida em poços petrolíferos saturada por CO₂. Os aminoácidos conquistaram um interesse renovado na inibição da corrosão devido ao pedido de desenvolvimento sustentável do ambiente ecológico (Kokalj et al., 2020; Olivares et al., 2006). Os grupos carboxila de aminoácidos podem reagir com os grupos hidroxila na estrutura de dextrana, realizando assim a modificação verde dos inibidores de corrosão à base de dextrana. As medições eletroquímicas mostram que o S-LDT exibe um desempenho de inibição com alta eficiência de inibição e estabilidade, com 99,7% após 72 imersão (Q. H. Zhang et al., 2021)

O efeito do peso molecular do dextrano como inibidor de corrosão para aço carbono em meio ácido forte (15% de H₂SO₄) foi avaliado utilizando as técnicas de perda de peso, eletroquímica (EIS, EFM e PDP) e de triagem de superfície (SEM, EDAX, AFM e XPS). O dextrano com peso molecular de 100.000–200.000 g.mol⁻¹ exibiu a maior eficiência de inibição de 51,38% a 25 °C. Com base nos resultados da polarização potenciodinâmica (PDP), o dextrano se comportou como um inibidor de corrosão do tipo misto. A eficiência de inibição do dextrano varia inversamente com o peso molecular, mas diretamente com a temperatura (Solomon, Umoren, et al., 2018). Também foi avaliada a incorporação de nanopartículas de prata (AgNPs) em matrizes de dextrano e combinação com KI 1 mM com o intuito de aumentar a eficiência de inibição do dextrano. A capacidade protetora do dextrano aumentou de 51,38% para 86,82% por infusão de AgNPs e para 94,21% por combinação com KI a 25 °C. Os resultados da análise de superfície confirmam a presença de moléculas de aditivos na superfície metálica estudada. Os resultados de XPS revelam que os AgNPs estão na forma de óxido, enquanto os íons iodeto estão na forma de triiodeto e íons pentaiodeto na superfície do metal (Solomon, Umoren, et al., 2018).

A síntese do copolímero de dextrina grafiteado com acetato de polivinila foi aplicada como inibidor de corrosão para o aço carbono em solução de 15% de HCl. Foram feitas medições eletroquímicas para comparar as propriedades anticorrosivas da dextrina e seu copolímero. Os resultados do estudo de polarização confirmaram que ambos os polímeros eram do tipo misto. O copolímero de enxerto sintetizado apresentou excelente eficiência anticorrosiva, 98,39%, em comparação com a dextrina nativa ,84,56%, conforme confirmado por estudos eletroquímicos (Biswas et al., 2019).

4.3 Celulose

A celulose é um biopolímero de carboidrato existente em maior quantidade em comparação com outros biopolímeros, e encontra-se nos tecidos da planta, constituindo cerca de um terço destas, tendo aplicações farmacêuticas, cosméticas e alimentícias (Nwanonyi et al., 2016; Solomon et al., 2010). Os derivados da celulose apresentam uma reatividade química na qual podem ser usados como inibidores de corrosão (Cheng et al., 2007; Nwanonyi et al., 2016; Umoren et al., 2018b).

A carboximetilcelulose (CMC) e a hidroxietilcelulose (HEC) foram avaliadas como inibidores de corrosão da liga AZ31 Mg em solução de NaCl 3,5% em peso. A eficiência como inibidores de corrosão foi avaliada por Perda de massa, gasometria, espectroscopia de impedância eletroquímica, e técnicas de polarização potenciodinâmica. A CMC acelerou o processo de corrosão da liga de Mg, enquanto que a HEC inibiu moderadamente a corrosão, com eficiência de 64,13% (Umoren et al., 2020).

Outro estudo avaliou aumentar a atividade de inibição da hidroxietilcelulose (HEC) com base na química do poliuretano. Foi analisado o uso da hidroxietilcelulose quimicamente modificada (CHEC), em solução de 15% de HCl em elevadas temperaturas. A capacidade da CHEC em suprimir a corrosão do aço macio (MS) foi avaliada usando técnicas de perda de peso, espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), potencial de circuito aberto (OCP) e polarização potenciodinâmica (PDP), e posteriormente confirmada por campo microscópio eletrônico de varredura por emissão (FESEM), espectroscopia de fotoelétrons de raios-X (XPS), e microscopia de força atômica (AFM). As medições eletroquímicas revelaram que a incorporação de apenas 1% do pré-polímero de poliuretano à estrutura do CHEC aumentou muito sua eficiência de inibição na solução ácida, mesmo em altas temperaturas. O CHEC adsorveu na superfície do MS e funcionou como um inibidor do tipo misto, com uma eficiência de inibição máxima de 93% a 80°C (Farhadian et al., 2021).

O desempenho anticorrosivo de compósitos de celulose-niacina para cobre em soluções de NaCl a 3,5% foi avaliado por meio de técnicas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). As medições de polarização potenciodinâmica confirmaram que os inibidores à base de celulose atuam como um inibidor do tipo misto. A eficiência de inibição do compósito de etilcelulose-niacina (NEC) foi 94,7% superior aos do compósito de celulose-niacina microcristalina (NMCC) e do composto de carboximetilcelulose-niacina (NMC) que foram 33,2 e 83,4%, respectivamente (Hasanin & Al Kiey, 2020)

4.4 Goma Arábica

A goma arábica (GA) é uma goma natural, feita a partir da exsudação de goma seca que pode ser extraída de algumas espécies de acácias, e é amplamente utilizada em alimentos, litografia, produtos farmacêuticos e cosméticos; sendo altamente solúvel em água e amplamente utilizada como emulsificante e estabilizante na indústria alimentícia e como aglutinante em tintas e composições pirotécnicas. Quimicamente, GA é uma mistura de cálcio, magnésio, sódio e potássio, sais de ácido arábico além de polissacarídeos de alto peso molecular (Manawi et al., 2017).

Métodos eletroquímicos e de simulação molecular foram usados para investigar a aplicação de GA como um polímero natural inibidor de corrosão para aço carbono. Os resultados da análise Tafel mostraram que a GA funciona como um inibidor de corrosão do tipo misto em aço carbono com o potencial de circuito aberto aumentado. Em salmoura sintética, o estudo de isoterma de adsorção mostrou que os filmes inibidores de GA foram formados principalmente por quimissorção. A eficiência de corrosão do GA medida pela curva de polarização, resistência de polarização e medidas de impedância, foram 94,0, 83,5 e 90%, respectivamente (Shen et al., 2019).

Um composto de GA com nanopartículas de prata (AgNPs) foi formulado como inibidor de corrosão para aço carbono em meio 15% HCl e 15% H₂SO₄, e avaliado por meio de técnicas gravimétricas, eletroquímicas (EIS, EFM, DEIS, & TP) e de avaliação de superfície (SEM, EDAX, AFM e XPS) no estudo anticorrosão. Os resultados mostram que GA-AgNPs atua como

inibidor do tipo misto em solução de H₂SO₄ a 15% , mas como tipo anódico em solução de HCl a 15%, já a eficiência como inibidor de corrosão se dá em soluções de HCl com 88,60% (Solomon, Gerengi, et al., 2018).

5. Considerações Finais

O uso de biopolímeros está ganhando terreno na fabricação de formulações de inibidores para várias aplicações práticas, e sua química é simples, uma vez que o mecanismo de adsorção que os acompanha envolve adsorção física em superfícies metálicas ou por quimissorção. Algumas misturas de polímeros de carboidratos também são conhecidas por conterem constituintes químicos capazes de formar camadas de passivação que impedem a passagem de íons corrosivos e moléculas através da interface metal/solução.

Biopolímeros de carboidratos, como usados nesta revisão, são macro compostos que possuem unidades monoméricas ligadas covalentemente para formar longas cadeias de açúcar macromoleculares com massas moleculares relativamente altas. Na inibição de corrosão, eles representam um conjunto de macromoléculas quimicamente estáveis, biodegradáveis e ecologicamente corretas com forças de inibição que podem garantir a proteção de superfícies metálicas; tornando-os revestimentos de proteção e revestimentos de metal eficazes.

Este artigo de revisão sistemática descreveu os avanços recentes no que diz respeito à utilização eficiente de biopolímeros a base de carboidratos como inibidores de corrosão. Todos os artigos listados nesta revisão sistemática relataram que a modificação química dos biopolímeros a base de carboidratos melhorou a eficiência dos compósitos no que tange a inibição da corrosão. É nítido que a maioria dos artigos abordam o problema da corrosão em dutos e poços de petróleo, onde o meio é altamente corrosivo.

A quitosana é o biopolímero mais amplamente estudado, seguida do dextrano das gomas e da celulose, seja in natura ou em compósitos. Extratos e outros polissacarídeos também foram avaliados quando a eficiência como inibidores de corrosão.

O metal mais estudado para a análise de corrosão foi o aço carbono, visto que é o metal mais utilizado no mundo, desde dutos e poços de petróleo a infraestrutura e construção civil. Metais como cobre, ligas de alumínio e magnésio e aço inoxidável também foram abordados, porém em quantidade muito inferior.

Para aceleração da corrosão os artigos mostram que o uso de soluções de HCl e NaCl são as mais utilizadas para se aproximar da realidade do processo corrosivo.

No monitoramento da corrosão os métodos mais empregados foram a Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), Polarização potenciodinâmica (PDP), perda de peso, Microscopia eletrônica de varredura (SEM), Potencial de circuito aberto (OCP) e Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR). Também foi abordada o uso de ferramentas computacionais/teóricas, como as simulações de Dinâmica Molecular (MD), que além de promoverem uma maior compreensão dos processos de corrosão ajudam no estudo da reatividade dos inibidores para o entendimento da adsorção nas superfícies.

A maioria dos artigos analisados apresentaram estudos onde a eficiência contra a corrosão é superior a 90%, porém muitos destes artigos evidenciam que tal proteção contra corrosão ocorre por um curto tempo, concluindo que a solubilidade do biopolímeros pode interferir na proteção no longo prazo. A quitosana possui um ótimo desempenho, segundo os autores estudados, porém a eficiência do polímero é diminuída com o passar do tempo, já seus compósitos carboximetilcelulose (CMC) e a hidroxietilcelulose (HEC), por exemplo, apresentam melhores desempenho no longo prazo, mostrando que uma menor solubilidade melhora a eficiência de inibição no longo prazo. Os compósitos de etilcelulose modificados e/ou micro cristalizados e hidroxietilcelulose apresentaram eficiência superior a 90% mesmo em períodos maiores de análise.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja estudado a eficiência das técnicas utilizadas para avaliação da inibição da corrosão bem como o meio aquoso que simula o ambiente corrosivo, visto que este impacta diretamente nos resultados

apresentados.

Agradecimentos

Os autores agradeceram a Rede de Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia Legal (BIONORTE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por apoiar o trabalho.

Referências

- An, Y., Jiang, G., Ren, Y., Zhang, L., Qi, Y., & Ge, Q. (2015). An environmental friendly and biodegradable shale inhibitor based on chitosan quaternary ammonium salt. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.005>
- Ansari, K. R., Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., Mazumder, M. A. J., & Singh, A. (2020). Chitosan Schiff base: an environmentally benign biological macromolecule as a new corrosion inhibitor for oil & gas industries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.106>
- Antony, R., Arun, T., & Manickam, S. T. D. (2019). A review on applications of chitosan-based Schiff bases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 615–633. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.047>
- Anush, S. M., Vishalakshi, B., Kalluraya, B., & Manju, N. (2018). Synthesis of pyrazole-based Schiff bases of Chitosan: Evaluation of antimicrobial activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 446–452. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.129>
- Ashassi-Sorkhabi, H., & Kazempour, A. (2020). Chitosan, its derivatives and composites with superior potentials for the corrosion protection of steel alloys: A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 237(March), 116110. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116110>
- Avérous, L., & Pollet, E. (2012). Environmental Silicate Nano-Biocomposites. *Green Energy and Technology*, 50. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4108-2>
- Azmana, M., Mahmood, S., Hilles, A. R., Rahman, A., Arifin, M. A. Bin, & Ahmed, S. (2021). A review on chitosan and chitosan-based bionanocomposites: Promising material for combatting global issues and its applications. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 185, pp. 832–848). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.023>
- Bahari, H. S., Ye, F., Carrillo, E. A. T., Leliopoulos, C., Savaloni, H., & Dutta, J. (2020). Chitosan nanocomposite coatings with enhanced corrosion inhibition effects for copper. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1566–1577. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.035>
- Baran, T., & Menteş, A. (2015). Cu(II) and Pd(II) complexes of water soluble O-carboxymethyl chitosan Schiff bases: Synthesis, characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 542–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.05.021>
- Biswas, A., Das, D., Lgaz, H., Pal, S., & Nair, U. G. (2019). Biopolymer dextrin and poly (vinyl acetate) based graft copolymer as an efficient corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid: Electrochemical, surface morphological and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 275, 867–878. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.095>
- Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., & Mélo, T. J. A. (2011). Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 6(2), 127–139. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19998664>
- Carneiro, J., Tedim, J., Fernandes, S. C. M., Freire, C. S. R., Gandini, A., Ferreira, M. G. S., & Zheludkevich, M. L. (2013). Functionalized chitosan-based coatings for active corrosion protection. *Surface and Coatings Technology*, 226, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.035>
- Carneiro, J., Tedim, J., & Ferreira, M. G. S. (2015). Chitosan as a smart coating for corrosion protection of aluminum alloy 2024: A review. *Progress in Organic Coatings*, 89, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.03.008>
- Chai, C., Xu, Y., Shi, S., Zhao, X., Wu, Y., Xu, Y., & Zhang, L. (2018). Functional polyaspartic acid derivatives as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. *RSC Advances*, 8(44), 24970–24981. <https://doi.org/10.1039/c8ra03534b>
- Chang, K. L. B., Tai, M. C., & Cheng, F. H. (2001). Kinetics and products of the degradation of chitosan by hydrogen peroxide. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 49, Issue 10, pp. 4845–4851). <https://doi.org/10.1021/jf001469g>
- Charitha, B. P., Chenan, A., & Rao, P. (2017). Enhancement of Surface Coating Characteristics of Epoxy Resin by Dextran: An Electrochemical Approach. In *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Vol. 56, Issue 5, pp. 1137–1147). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03274>
- Charitha, B. P., & Rao, P. (2018). Pullulan as a potent green inhibitor for corrosion mitigation of aluminum composite: Electrochemical and surface studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.218>
- Chauhan, D. S., Ansari, K. R., Sorour, A. A., Quraishi, M. A., Lgaz, H., & Salghi, R. (2018). Thiosemicarbazide and thiocarbonylhydrazide functionalized chitosan as ecofriendly corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1747–1757. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.050>
- Chauhan, D. S., Mouaden, K. EL, Quraishi, M. A., & Bazzi, L. (2020). Aminotriazolethiol-functionalized chitosan as a macromolecule-based bioinspired corrosion inhibitor for surface protection of stainless steel in 3.5% NaCl. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.283>
- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., & Qurashi, A. (2021). Recent trends in environmentally sustainable Sweet corrosion inhibitors. *Journal of Molecular Liquids*, 326, 115117. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115117>

- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., Sorour, A. A., Saha, S. K., & Banerjee, P. (2019). Triazole-modified chitosan: A biomacromolecule as a new environmentally benign corrosion inhibitor for carbon steel in a hydrochloric acid solution. *RSC Advances*, 9(26), 14990–15003. <https://doi.org/10.1039/c9ra00986h>
- Cheng, S., Chen, S., Liu, T., Chang, X., & Yin, Y. (2007). Carboxymethylchitosan as an ecofriendly inhibitor for mild steel in 1 M HCl. *Materials Letters*, 61(14–15), 3276–3280. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.11.102>
- Chugh, B., Singh, A. K., Chaouiki, A., Salghi, R., Thakur, S., & Pani, B. (2020). A comprehensive study about anti-corrosion behaviour of pyrazine carbohydrazide: Gravimetric, electrochemical, surface and theoretical study. *Journal of Molecular Liquids*, 299, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112160>
- Chugh, B., Singh, A. K., Poddar, D., Thakur, S., Pani, B., & Jain, P. (2020). Relation of degree of substitution and metal protecting ability of cinnamaldehyde modified chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 234, 115945. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115945>
- Clavijo, S., Membrives, F., Quiroga, G., Boccaccini, A. R., & Santillán, M. J. (2016). Electrophoretic deposition of chitosan/Bioglass® and chitosan/Bioglass®/TiO₂ composite coatings for bioimplants. *Ceramics International*, 42(12), 14206–14213. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.178>
- Clifford, A., Pang, X., & Zhitomirsky, I. (2018). Biomimetically modified chitosan for electrophoretic deposition of composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 544(December 2017), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.02.028>
- Cui, G., Guo, J., Zhang, Y., Zhao, Q., Fu, S., Han, T., Zhang, S., & Wu, Y. (2019). Chitosan oligosaccharide derivatives as green corrosion inhibitors for P110 steel in a carbon-dioxide-saturated chloride solution. *Carbohydrate Polymers*, 203, 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.038>
- Darmokoemo, H., Suyanto, S., Anggara, L. S., Amenaghawon, A. N., & Kusuma, H. S. (2018). Application of carboxymethyl chitosan-benzaldehyde as anticorrosion agent on steel. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4397867>
- Eduok, U., Ohaeri, E., & Szpunar, J. (2018). Electrochemical and surface analyses of X70 steel corrosion in simulated acid pickling medium: Effect of poly (N-vinyl imidazole) grafted carboxymethyl chitosan additive. *Electrochimica Acta*, 278, 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.05.060>
- El-Sherbiny, I. M., Lins, R. J., Abdel-Bary, E. M., & Harding, D. R. K. (2005). Preparation, characterization, swelling and in vitro drug release behaviour of poly[N-acryloylglycine-chitosan] interpolymers. pH and thermally-responsive hydrogels. *European Polymer Journal*, 41(11), 2584–2591. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.035>
- EL, Mouaden, K., Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., Bazzi, L., & Hilali, M. (2020). Cinnamaldehyde-modified chitosan as a bio-derived corrosion inhibitor for acid pickling of copper: Microwave synthesis, experimental and computational study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 3709–3717. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.137>
- El Mouaden, K., El Ibrahim, B., Oukhrif, R., Bazzi, L., Hammouti, B., Jbara, O., Tara, A., Chauhan, D. S., & Quraishi, M. A. (2018). Chitosan polymer as a green corrosion inhibitor for copper in sulfide-containing synthetic seawater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 1311–1323. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.182>
- Fardioui, M., Rbaa, M., Benhiba, F., Galai, M., Guedira, T., Lakhrissi, B., Warad, I., & Zarrouk, A. (2021). Bio-active corrosion inhibitor based on 8-hydroxyquinoline-grafted-Alginate: Experimental and computational approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 323, 114615. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114615>
- Farhadian, A., Assar Kashani, S., Rahimi, A., Oguzie, E. E., Javidparvar, A. A., Nwanonyi, S. C., Yousefzadeh, S., & Nabid, M. R. (2021). Modified hydroxyethyl cellulose as a highly efficient eco-friendly inhibitor for suppression of mild steel corrosion in a 15% HCl solution at elevated temperatures. *Journal of Molecular Liquids*, 338, 116607. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116607>
- Farhadian, A., Varfolomeev, M. A., Shaabani, A., Nasiri, S., Vakhitov, I., Zaripova, Y. F., Yarkovoi, V. V., & Sukhov, A. V. (2020). Sulfonated chitosan as green and high cloud point kinetic methane hydrate and corrosion inhibitor: Experimental and theoretical studies. *Carbohydrate Polymers*, 236, 116035. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116035>
- Figueiredo, E. P., & Meira, G. (2013). Corrosión de armadura de estructuras de hormigón. ALCONPAT Internacional - Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, *Patología y Recuperación de La Construcción*, 30.
- Franchetti, S. M. M., & Marconato, J. C. (2006). Polímeros biodegradáveis - uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. *Química Nova*, 29(4), 811–816. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422006000400031>
- Gebhardt, F., Seuss, S., Turhan, M. C., Hornberger, H., Virtanen, S., & Boccaccini, A. R. (2012). Characterization of electrophoretic chitosan coatings on stainless steel. *Materials Letters*, 66(1), 302–304. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.08.088>
- Giuliani, C., Pascucci, M., Riccucci, C., Messina, E., Salzano de Luna, M., Lavorgna, M., Ingo, G. M., & Di Carlo, G. (2018). Chitosan-based coatings for corrosion protection of copper-based alloys: A promising more sustainable approach for cultural heritage applications. *Progress in Organic Coatings*, 122(April), 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.05.002>
- Gupta, N. K., Joshi, P. G., Srivastava, V., & Quraishi, M. A. (2018). Chitosan: A macromolecule as green corrosion inhibitor for mild steel in sulfamic acid useful for sugar industry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 704–711. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.064>
- Hasanin, M. S., & Al Kiey, S. A. (2020). Environmentally benign corrosion inhibitors based on cellulose niacin nano-composite for corrosion of copper in sodium chloride solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.040>
- Hassan, R. M., Ibrahim, S. M., Takagi, H. D., & Sayed, S. A. (2018). Kinetics of corrosion inhibition of aluminum in acidic media by water-soluble natural polymeric chondroitin-4-sulfate as anionic polyelectrolyte inhibitor. *Carbohydrate Polymers*, 192, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.066>

- Heise, S., Höhlinger, M., Hernández, Y. T., Palacio, J. J. P., Rodríguez Ortiz, J. A., Wagener, V., Virtanen, S., & Boccaccini, A. R. (2017). Electrophoretic deposition and characterization of chitosan/bioactive glass composite coatings on Mg alloy substrates. *Electrochimica Acta*, 232, 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.081>
- Hernández-Padrón, G., Rojas, F., & Castaño, V. (2006). Development and testing of anticorrosive SiO₂/phenolic-formaldehydic resin coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(3–4), 1207–1214. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.070>
- Izadi, M., Shahrabi, T., & Ramezanzadeh, B. (2018). Active corrosion protection performance of an epoxy coating applied on the mild steel modified with an eco-friendly sol-gel film impregnated with green corrosion inhibitor loaded nanocontainers.pdf. *Applied Surface Science*, 491–505. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.185>
- Jena, G., Anandkumar, B., Vanithakumari, S. C., George, R. P., Philip, J., & Amarendra, G. (2020). Graphene oxide-chitosan-silver composite coating on Cu-Ni alloy with enhanced anticorrosive and antibacterial properties suitable for marine applications. *Progress in Organic Coatings*, 139, 105444. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105444>
- Joshi, J. M., & Sinha, V. K. (2007). Ceric ammonium nitrate induced grafting of polyacrylamide onto carboxymethyl chitosan. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 67, Issue 3, pp. 427–435). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.021>
- Koch, G. (2017). Cost of corrosion. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Kokalj, A., Behzadi, H., & Farahati, R. (2020). DFT study of aqueous-phase adsorption of cysteine and penicillamine on Fe(110): Role of bond-breaking upon adsorption. *Applied Surface Science*, 514(February), 145896. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145896>
- Lai, X., Hu, J., Ruan, T., Zhou, J., & Qu, J. (2021). Chitosan derivative corrosion inhibitor for aluminum alloy in sodium chloride solution: A green organic/inorganic hybrid. *Carbohydrate Polymers*, 265, 118074. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118074>
- Liu, J., Yu, Q., Yu, M., Li, S., Zhao, K., Xue, B., & Zu, H. (2018). Silane modification of titanium dioxide-decorated graphene oxide nanocomposite for enhancing anticorrosion performance of epoxy coatings on AA-2024. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.267>
- Luo, X., Ci, C., Li, J., Lin, K., Du, S., Zhang, H., Li, X., Cheng, Y. F., Zang, J., & Liu, Y. (2019). 4-aminoazobenzene modified natural glucomannan as a green eco-friendly inhibitor for the mild steel in 0.5 M HCl solution. *Corrosion Science*, 151(November 2017), 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.027>
- Ma, Z., Wang, W., Wu, Y., He, Y., & Wu, T. (2014). Oxidative degradation of chitosan to the low molecular water-soluble chitosan over peroxotungstate as chemical scissors. In *PLoS ONE* (Vol. 9, Issue 6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100743>
- Macedo, R. G. M. de A., Marques, N. do N., Tonholo, J., & Balaban, R. de C. (2019). Water-soluble carboxymethylchitosan used as corrosion inhibitor for carbon steel in saline medium. *Carbohydrate Polymers*, 205, 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.081>
- Manawi, Y., Kochkodan, V., Mohammad, A. W., & Ali Atieh, M. (2017). Arabic gum as a novel pore-forming and hydrophilic agent in polysulfone membranes. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 529, pp. 95–104). <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.02.002>
- Marzorati, S., Verotta, L., & Trasatti, S. P. (2019). Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes. *Molecules*, 24(1). <https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
- Mobin, M., Basik, M., & Aslam, J. (2018). Boswellia serrata gum as highly efficient and sustainable corrosion inhibitor for low carbon steel in 1 M HCl solution: Experimental and DFT studies. *Journal of Molecular Liquids*, 263, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.150>
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., & Group, P. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>
- Nadi, I., Belattmania, Z., Sabour, B., Reani, A., Sahibed-dine, A., Jama, C., & Bentiss, F. (2019). Sargassum muticum extract based on alginate biopolymer as a new efficient biological corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid pickling environment: Gravimetric, electrochemical and surface studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.253>
- Negi, H., Verma, P., & Singh, R. K. (2021). A comprehensive review on the applications of functionalized chitosan in petroleum industry. *Carbohydrate Polymers*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118125>
- Neves, R. M., Jr, H. L. O., Zattera, A. J., & Amico, S. C. (2021). Recent studies on modified cellulose/nanocellulose epoxy composites: A systematic review. *Carbohydrate Polymers*, 255, 1–17.
- Nikpour, S., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., & Mahdavian, M. (2019). Eriobotrya japonica Lindl leaves extract application for effective corrosion mitigation of mild steel in HCl solution: Experimental and computational studies. *Construction and Building Materials*, 220, 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.005>
- Nwanonyi, S., Ogbobe, O., Madufor, I., & Oguzie, E. (2016). Inhibitive Performance of Hydroxypropyl Cellulose and Potassium Iodide on the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Environment. *American Chemical Science Journal*, 16(2), 1–12. <https://doi.org/10.9734/acsj/2016/28250>
- O'Connor, A., Sargeant, J., & Wood, H. (2017). Systematic reviews. *Veterinary Epidemiology: Fourth Edition*, 397–420. <https://doi.org/10.1002/9781118280249.ch19>
- Olivares, O., Likhanova, N. V., Gómez, B., Navarrete, J., Llanos-Serrano, M. E., Arce, E., & Hallen, J. M. (2006). Electrochemical and XPS studies of decylamides of α -amino acids adsorption on carbon steel in acidic environment. In *Applied Surface Science* (Vol. 252, Issue 8, pp. 2894–2909). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.04.040>

- Oliveira, J. A. M., de Santana, R. A. C., & Wanderley Neto, A. de O. (2020). Characterization of the chitosan-tungsten composite coating obtained by electrophoretic deposition. *Progress in Organic Coatings*, 143, 105631. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105631>
- Pais, M., George, S. D., & Rao, P. (2021). Glycogen nanoparticles as a potential corrosion inhibitor. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 2117–2129. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.185>
- Pais, M., & Rao, P. (2020). Maltodextrin for corrosion mitigation of zinc in sulfamic acid: Electrochemical, surface and spectroscopic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 575–585. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.197>
- Pakseresht, A., Alizadeh, H., Hanaei, A., Heidarshenas, B., Shahbazkhan, A., & Ahmadi, N. P. (2018). The Effect of accelerator types on the phosphate Zn-12Ni electrodeposite coating. *Material Science & Engineering International Journal*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/mseij.2018.02.00062>
- Pourhashem, S., Vaezi, M. R., Rashidi, A., & Bagherzadeh, M. R. (2017). Exploring corrosion protection properties of solvent based epoxy-graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel. *Corrosion Science*, 115, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.008>
- Pozzo, L. de Y., Conceição, T. F. da, Spinelli, A., Scharnagl, N., & Nunes Pires, A. T. (2019). The influence of the crosslinking degree on the corrosion protection properties of chitosan coatings in simulated body fluid. *Progress in Organic Coatings*, 137, 105328. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105328>
- Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media - A review. *Materials Letters*, 62(1), 113–116. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.079>
- Ramezanzadeh, B., Ghasemi, E., Mahdavian, M., Changizi, E., & Mohamadzadeh Moghadam, M. H. (2015). Covalently-grafted graphene oxide nanosheets to improve barrier and corrosion protection properties of polyurethane coatings. *Carbon*, 93, 555–573. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.094>
- Rani, B. E. A., & Basu, B. B. J. (2012). Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview. *International Journal of Corrosion*, 2012(6), 16–25. <https://doi.org/10.1155/2012/380217>
- Rbaa, M., Benhiba, F., Hssissou, R., Lakhrissi, Y., Lakhrissi, B., Touhami, M. E., Warad, I., & Zarrouk, A. (2021). Green synthesis of novel carbohydrate polymer chitosan oligosaccharide grafted on D-glucose derivative as bio-based corrosion inhibitor. *Journal of Molecular Liquids*, 322, 114549. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114549>
- Rbaa, M., Fardioui, M., Verma, C., Abousalem, A. S., Galai, M., Ebenso, E. E., Guedira, T., Lakhrissi, B., Warad, I., & Zarrouk, A. (2020). 8-Hydroxyquinoline based chitosan derived carbohydrate polymer as biodegradable and sustainable acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental and computational analyses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 645–655. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.200>
- Ribeiro, D. V., & Helene, P. (2013). *Corrosão em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. Elsevier, 1, 240 p. [https://barnard.edu/sites/default/files/inline/student_user_guide_for_spss.pdf%0Ahttp://www.ibm.com/support%0Ahttp://www.spss.com/sites/dm-book/legacy/ProgDataMgmt_SPSS17.pdf%0Ahttps://www.neps-data.de/Portals/0/Working Papers/WP_XLV.pdf%0Ahttp://www2.psy](https://barnard.edu/sites/default/files/inline/student_user_guide_for_spss.pdf%0Ahttp://www.ibm.com/support%0Ahttp://www.spss.com/sites/dm-book/legacy/ProgDataMgmt_SPSS17.pdf%0Ahttps://www.neps-data.de/Portals/0/Working%20Papers/WP_XLV.pdf%0Ahttp://www2.psy)
- Sambyal, P., Ruhi, G., Dhawan, S. K., Bisht, B. M. S., & Gairola, S. P. (2018). Enhanced anticorrosive properties of tailored poly(aniline-anisidine)/chitosan/SiO₂ composite for protection of mild steel in aggressive marine conditions. *Progress in Organic Coatings*, 119, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.014>
- Sangeetha, Y., Meenakshi, S., & SairamSundaram, C. (2015). Corrosion mitigation of N-(2-hydroxy-3-trimethyl ammonium)propyl chitosan chloride as inhibitor on mild steel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1244–1249. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.044>
- Sharma, S. K., Peter, A., & Obot, I. B. (2015). Potential of *Azadirachta indica* as a green corrosion inhibitor against mild steel, aluminum, and tin: a review. *Journal of Analytical Science and Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40543-015-0067-0>
- Shen, C., Alvarez, V., Koenig, J. D. B., & Luo, J. L. (2019). Gum Arabic as corrosion inhibitor in the oil industry: experimental and theoretical studies. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 54(5), 444–454. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2019.1613780>
- Singh, P., Chauhan, D. S., Chauhan, S. S., Singh, G., & Quraishi, M. A. (2019). Chemically modified expired Dapsone drug as environmentally benign corrosion inhibitor for mild steel in sulphuric acid useful for industrial pickling process. *Journal of Molecular Liquids*, 286, 110903. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110903>
- Skale, S., Doleček, V., & Slemnik, M. (2007). Substitution of the constant phase element by Warburg impedance for protective coatings. *Corrosion Science*, 49(3), 1045–1055. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.027>
- Solomon, M. M., Gerengi, H., Umoren, S. A., Essien, N. B., Essien, U. B., & Kaya, E. (2018). Gum Arabic-silver nanoparticles composite as a green anticorrosive formulation for steel corrosion in strong acid media. *Carbohydrate Polymers*, 181, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.051>
- Solomon, M. M., Umoren, S. A., Obot, I. B., Sorour, A. A., & Gerengi, H. (2018). Exploration of Dextran for Application as Corrosion Inhibitor for Steel in Strong Acid Environment: Effect of Molecular Weight, Modification, and Temperature on Efficiency. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10(33), 28112–28129. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b09487>
- Solomon, M. M., Umoren, S. A., Udosoro, I. I., & Udoh, A. P. (2010). Inhibitive and adsorption behaviour of carboxymethyl cellulose on mild steel corrosion in sulphuric acid solution. *Corrosion Science*, 52(4), 1317–1325. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.041>
- Sørbotten, A., Horn, S. J., Eijsink, V. G. H., & Vårum, K. M. (2005). Degradation of chitosans with chitinase B from *Serratia marcescens*. In *FEBS Journal* (Vol. 272, Issue 2, pp. 538–549). <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2004.04495.x>
- Srivastava, M., Srivastava, S. K., Nikhil, Ji, G., & Prakash, R. (2019). Chitosan based new nanocomposites for corrosion protection of mild steel in aggressive chloride media. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.073>

- Tang, G., Ren, T., Yan, Z., Ma, L., Hou, X., & Huang, X. (2020). Preparation and anticorrosion resistance of a self-curing epoxy nanocomposite coating based on mesoporous silica nanoparticles loaded with perfluorooctyl triethoxysilane. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(36), 1–11. <https://doi.org/10.1002/app.49072>
- Tran, V. T., Lee, D. K., Kim, J., Jeong, K. J., Kim, C. S., & Lee, J. (2020). Magnetic Layer-by-Layer Assembly: From Linear Plasmonic Polymers to Oligomers. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(14), 16584–16591. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22684>
- Umoren, S. A., AlAhmary, A. A., Gasem, Z. M., & Solomon, M. M. (2018a). Evaluation of chitosan and carboxymethyl cellulose as ecofriendly corrosion inhibitors for steel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 1017–1028. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.014>
- Umoren, S. A., AlAhmary, A. A., Gasem, Z. M., & Solomon, M. M. (2018b). Evaluation of chitosan and carboxymethyl cellulose as ecofriendly corrosion inhibitors for steel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 1017–1028. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.014>
- Umoren, S. A., & Eduok, U. M. (2016). Application of carbohydrate polymers as corrosion inhibitors for metal substrates in different media: A review. *Carbohydrate Polymers*, 140, 314–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.038>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M., Madhankumar, A., & Obot, I. B. (2020). Exploration of natural polymers for use as green corrosion inhibitors for AZ31 magnesium alloy in saline environment. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115466. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115466>
- Urrea Medina, E., & Barría Pailaquilén, R. M. (2010). Systematic Reviews and Meta-analysis: Understanding the Best Evidence in Primary Healthcare. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 18(4), 824–831. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-11692010000400023&lng=en&nrm=iso&lng=en%5Cnhttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20922332
- Verma, C., & Quraishi, M. A. (2021). Gum Arabic as an environmentally sustainable polymeric anticorrosive material: Recent progresses and future opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184(April), 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.050>
- Vitório, J. A. P. (2003). Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia. Instituto Pernambucano de Avaliações e Perícias de Engenharia, 58. http://www.vitorioemelo.com.br/publicacoes/Fundamentos_Patologia_Estruturas_Pericias_Engenharia.pdf
- Wei, H., Heidarshenas, B., Zhou, L., Hussain, G., Li, Q., & Ostrikov, K. (Ken). (2020). Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art. *Materials Today Sustainability*, 10, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>
- Wolyneć, S. (2003). *Técnicas Eletroquímicas de corrosão* (EdUSP (ed.); 1a).
- Yang, F., Liu, Y., Liu, T., Liu, S., & Zhao, H. (2019). Aniline trimer-including carboxymethylated β -cyclodextrin as an efficient corrosion inhibitor for Q235 carbon steel in 1 M HCl solution. *RSC Advances*, 9(52), 30249–30258. <https://doi.org/10.1039/c9ra04047a>
- Zhang, K., Yang, W., Xu, B., Chen, Y., Yin, X., Liu, Y., & Zuo, H. (2018). Inhibitory effect of konjac glucomanan on pitting corrosion of AA5052 aluminium alloy in NaCl solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 517, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.092>
- Zhang, K., Yang, W., Yin, X., Chen, Y., Liu, Y., Le, J., & Xu, B. (2018). Amino acids modified konjac glucomannan as green corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. *Carbohydrate Polymers*, 181, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.069>
- Zhang, Q. H., Hou, B. S., Li, Y. Y., Zhu, G. Y., Lei, Y., Wang, X., Liu, H. F., & Zhang, G. A. (2021). Dextran derivatives as highly efficient green corrosion inhibitors for carbon steel in CO₂-saturated oilfield produced water: Experimental and theoretical approaches. *Chemical Engineering Journal*, 424, 130519. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130519>
- Zhang, W., Li, H. J., Chen, L., Zhang, S., Ma, Y., Ye, C., Zhou, Y., Pang, B., & Wu, Y. C. (2020). Fructan from *Polygonatum cyrtoneuma* Hua as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in HCl media. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116216>
- Zhang, W., Nie, B., Li, H. J., Li, Q., Li, C., & Wu, Y. C. (2021). Inhibition of mild steel corrosion in 1 M HCl by chondroitin sulfate and its synergistic effect with sodium alginate. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117842. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117842>
- Zhang, W., Wu, Y. C., & Li, H. J. (2021). *Apostichopus japonicus* polysaccharide as efficient sustainable inhibitor for mild steel against hydrochloric acid corrosion. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114923. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114923>
- Zhao, Q., Guo, J., Cui, G., Han, T., & Wu, Y. (2020). Chitosan derivatives as green corrosion inhibitors for P110 steel in a carbon dioxide environment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 194, 111150. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111150>